LASER EN EL KILOMETRO FINAL • AGUJEROS NEGROS ACUSTICOS

INVESTIGACION y CIENCIA

SEPTIEMBRE 2002
5 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Terapia glucídica

Dinosaurios gigantes

Supersimetría

Corazón artificial

Nariz del topo





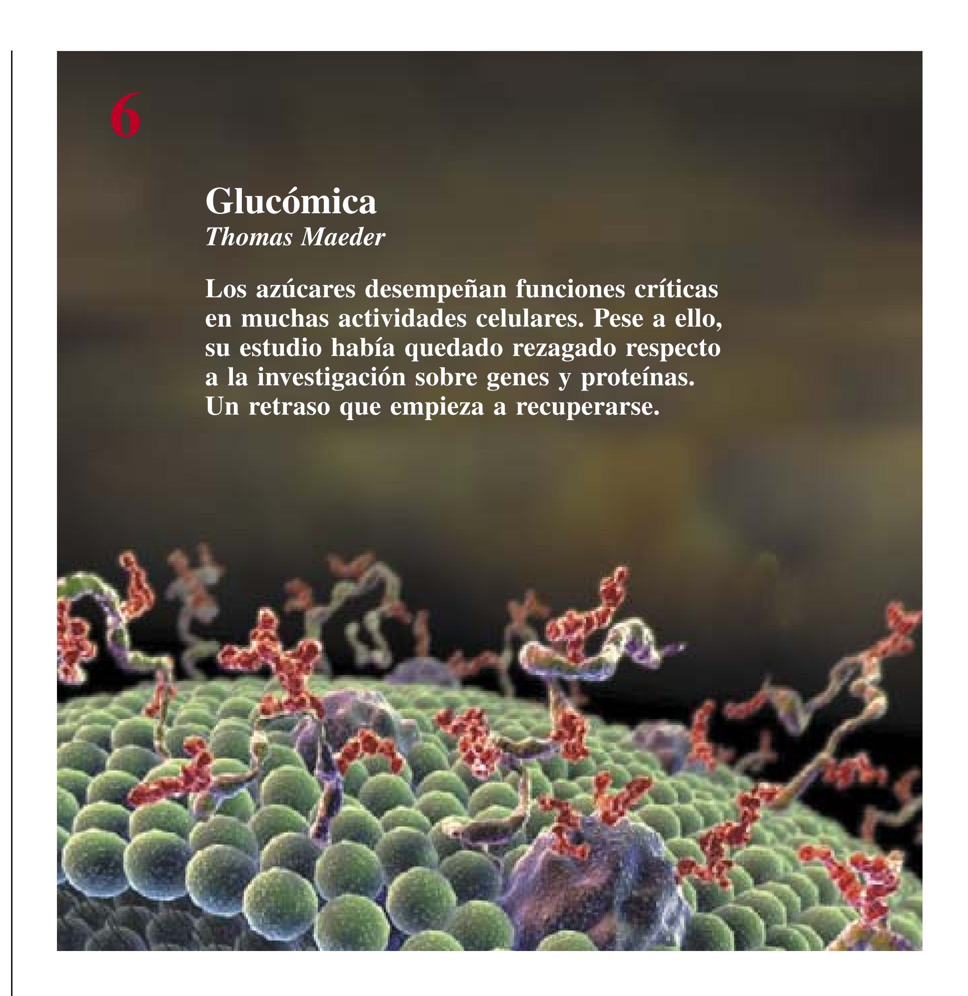
Septiembre de 2002 Número 312

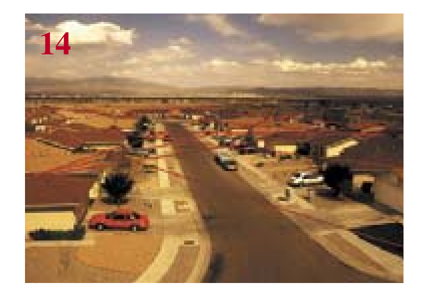
SECCIONES



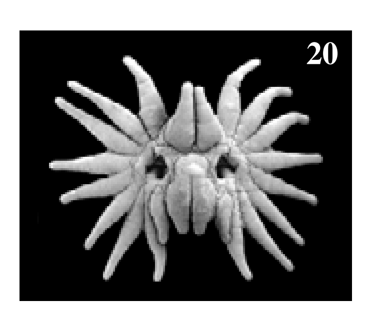












Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNACIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisót., centro, izda.
28009 Madrid
Tel. 914 097 045
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Esteban Santiago: *Glucómica*; Joandoménec Ros: *Nariz de topo*; Cristóbal Pera: *Exitos y limitaciones de un corazón artificial*; Ramón Pascual: *Descubrir la supersimetría*; Luis Bou: *RoboCup: la copa robótica mundial de fútbol* y *Aventuras problemáticas*; Angel Garcimartín: *Agujeros negros acústicos* y *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Apuntes, Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*



Portada: Jeff Johnson, Hybrid Medical Animation

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	55,00 euro	100,00 euro
Extranjero	80,00 euro	150,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,00 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

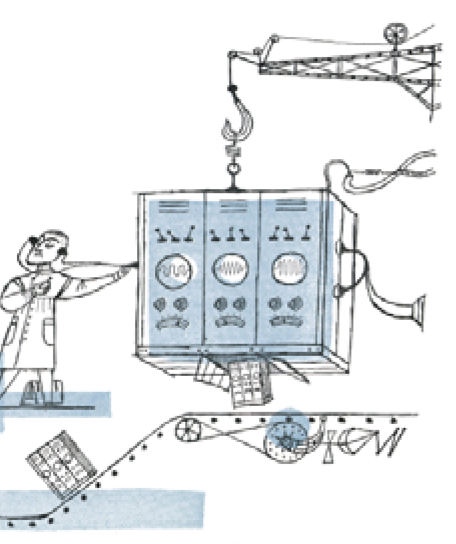
...cincuenta años

AUTORREGULACIÓN. «En la portada se indica a qué dedicamos este número monográfico: 'Control Automático'. El lector bien podría preguntar: '¿Control automático de qué?' Se aborda aquí la autorregulación de las máquinas que trabajan sustituyendo al hombre. Hoy existen muchas de esas máquinas. Y lo que reviste mayor alcance: evolucionan a ritmo acelerado. Las nuevas hornadas de ingenieros no sólo piensan en máquinas automáticas, sino también en fábricas automáticas. No está fuera de los límites de una imaginación razonable vaticinar el advenimiento de industrias automáticas; ya existen amplios sectores de la industria de la comunicación que se autocontrolan. La aceleración del ritmo equivale a una revolución técnica que habrá de condicionar poderosamente el futuro del hombre.»

CORRE, CONEJO, CORRE. «A lo largo de los dos últimos años se ha desatado en Australia una plaga de conejos que, cual roedor empavorecido, recorría sin rumbo el continente entero. Ha sido una epidemia provocada por el hombre. Creen los australianos que han dado, por fin, con una solución a esa pugna de siglos con tan fabulosamente prolífico animalito. La mixomatosis es una enfermedad vírica que resulta letal para los conejos y no afecta a los animales de granja ni a las personas. Los primeros intentos para implantarla fracasaron. Pero hace dos años los australianos descubrieron que los mosquitos propagan la enfermedad entre los animales. Esa fue la clave. Los exterminadores de conejos acorralan a un número extenso de estos mamíferos, les inoculan el virus de la mixomatosis y los afeitan para dejar al aire un trozo de piel donde puedan alimentarse fácilmente los mosquitos.»

...cien años

LA PRESA DE ASSUÁN. «La nueva presa monumental en Assuán, con mucho el mayor logro de su especie de los tiempos antiguos y modernos, y que formará un embalse en el Valle del Nilo de 1.000.000.000 de toneladas de agua de capacidad, no sólo producirá una revolución en los primitivos y penosos métodos de irrigación egipcios, sino que ganará para la agricultura vastas extensiones de suelo desértico. El viejo sistema se reducía al riego por inundación, aprovechando las crecidas del Nilo, de diferentes áreas de tierra o cuencas rodeadas de terraplenes. Se posibilita la navegación mediante una 'escalera' de cuatro esclusas, de 80 metros de largo por 10 metros de ancho cada una.»



Un fantástico objetivo último de la evolución de las máquinas: la autorreproducción, 1952

...ciento cincuenta años

UNA FUERZA MISTERIOSA. «La cola del cometa se alza desde el cuerpo del cometa por la fuerza del Sol, al igual que la calina sube de la tierra húmeda. En la formación de la cola se evidencia no sólo un principio generador de vapor, sino también un principio que arrastra ese vapor. Esa fuerza que arrastra al vapor debe ser algún agente oculto de interés considerable desde un punto de vista científico, ya que se trata de un principio evidentemente antagonista al gran atributo por doquier reinante de la gravitación.»

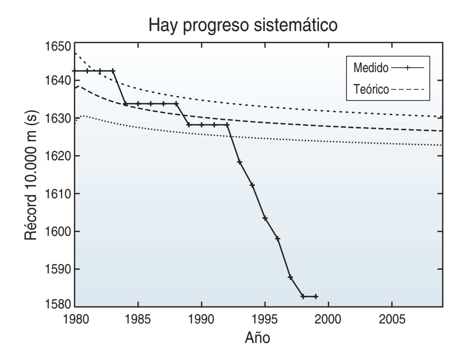
AGUA FÉTIDA. «Durante la estación en curso ha habido numerosos casos de cólera en la ciudad de Rochester (Nueva York), que han causado muchas bajas mortales. Entre las causas de la persistencia del morbo, culpa el 'Rochester American' al presente estado de estancamiento y suciedad del río Genesee, consecuencia de su menguado caudal. Han sostenido algunos que el cólera es una enfermedad exclusivamente geológica; es decir, nunca se manifiesta en regiones de formaciones primitivas, tales como las de granito de Nueva Inglaterra. Dicha teoría se cimienta en hechos muy sólidos.»

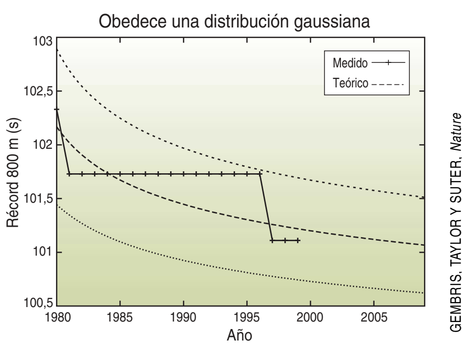
SUEÑOS DORADOS. «Hace exactamente siete años que la Nave Voladora de Mr. Rufus Porter apareció ilustrada y descrita en nuestra revista. Se la consideraba entonces una 'perfecta realidad'. Sabemos que en 1849 se estableció un plan para que la Nave Voladora transportara pasajeros hasta los campos auríferos de California; se vendieron algunas acciones. La Nave Voladora es una invención utilísima, pues se ha empleado para embaucar a la gente de este país durante los últimos siete años.» [*Nota de la Redacción: Porter fundó esta revista en 1845 y la vendió al cabo de 10 meses*.]

ESTADISTICA

Avance sin mejora

Tendemos a interpretar el progreso de las marcas atléticas como el resultado de la mejora en la preparación de los deportistas. Pero si se debiesen al azar, si las rigiese tan sólo cierta distribución estadística, en cada momento habría una determinada probabilidad de que en los años siguientes la mejor marca superase lo registrado hasta entonces: los récords acabarían batiéndose de todas formas. El análisis estadístico distingue entre ambas situaciones. Daniel Gembris, John G. Taylor y Dieter Suter han estudiado los registros de los campeonatos alemanes desde 1973 hasta 1996 y visto que sólo en cuatro disciplinas de 22 ha habido un progreso sistemático; en las otras, las mejores marcas se atienen a una distribución gaussiana. En las marcas mundiales se percibe más progreso sistemático que en las alemanas, pero va decayendo.





GEMBRIS, TAYLOR Y SUTER, *Nature*

Comparación del valor real y del esperado, conforme a una distribución gaussiana, de los récords mundiales de 10 km y 800 m

ANTROPOLOGIA

Los científicos y la desgracia de los yanomami

Patrick Tierney acusó al antropólogo Napoleon Chagnon de graves infracciones deontológicas. El revuelo fue grande; aunque el blanco era un individuo concreto, la disciplina misma quedaba en entredicho. Nuestra sección *Perfiles* enfrentaba a Chagnon a esas críticas en mayo de 2001. La Asociación Americana de Antropología encargó un informe a un comité. Se ha publicado este 2 de julio. El comité da la razón a Tierney en que Chagnon cometió una violación flagrante de los principios éticos: carecía del permiso de las autoridades venezolanas, pero se ganó a personas cercanas al presidente Carlos Andrés Pérez —controlaban la fraudulenta Fundación para la Ayuda de la Familia Campesina e Indígena— a fin de llegar hasta los yanomami del Orinoco. No tuvo el menor respeto por la salud de éstos; no guardó cuarentena, ni adoptó ninguna protección. En cambio, se rechaza que el genetista James Neel, asociado con Chagnon, les administrara una vacuna mortífera contra el sarampión en 1968. El informe mantiene que la vacuna salvó muchas vidas, pero no despeja las dudas sobre el verdadero objetivo de aquella misión quizá humanitaria. Los redactores se lavan las manos —“es un asunto muy complejo”— acerca de otra acusación que recoge Tierney: que la caracterización en las obras de Chagnon de los “feroces” yanomami como gentes de una gran violencia innata se basa en incidentes suscitados por el propio investigador; sí reconoce el comité que Chagnon ofrece una imagen injuriosa de los yanomami y no se ha molestado, pese a las oportunidades que ha tenido, en corregir las interpretaciones más ofensivas de la prensa. Pero lo peor, dice el informe, es la pésima situación sanitaria de ese pueblo: el paludismo lo está exterminando.

QUIMICA

Reacciones mecánicas

Quizá pasen a la historia los disolventes tóxicos que se emplean en química orgánica. Unos investigadores del laboratorio Ames del Departamento de Energía de Estados Unidos han ideado un proceso mecánico, conocido ya en la química metálica y en la inorgánica, para sintetizar nuevos compuestos orgánicos. Se colocan las materias primas sólidas en un recipiente junto con unas cuantas bolas y se agita vigorosamente. La agitación, efectuada a temperatura ambiente, 25 veces por segundo, rompe las redes cristalinas de las sustancias tan bien como pueda hacerlo un disolvente. Con los productos amorfos resultantes se construyen polímeros y fármacos. Además, en ciertos procesos, al molturar con bolas pueden combinarse todos los componentes de una vez; no hay que añadirlos uno a uno, en una serie de reacciones químicas.

—Zeeya Merali



DPTO. DE ENERGIA DE EE.UU.

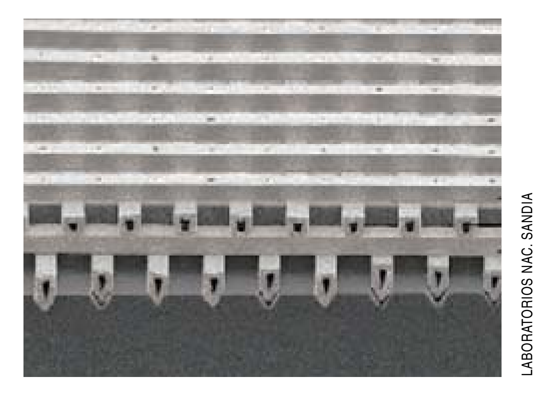
Las bolas de acero quizá sustituyan a los disolventes en la química orgánica

FOTONICA

Luz blanca, menos calor

Por término medio, la bombilla de incandescencia desprende mucho más calor que luz: el 90 por ciento de su energía la pierde en forma de calor. Incluso los tubos fluorescentes de alto rendimiento desperdician aproximadamente la mitad de su potencia. Puede que el futuro resulte más luminoso, y fresco, gracias a los filamentos microscópicos que está desarrollando el Laboratorio Nacional Sandia con cristales fotónicos. Estos estratos entretejidos controlan las ondas luminosas del mismo modo que los semiconductores controlan los electrones. En Sandia se han creado unos cristales fotónicos de volframio de 1,5 micras de ancho que absorben la luz infrarroja; ésta, a su vez, se puede transmutar en luz visible o ultravioleta.

—Charles Choi



LABORATORIOS NAC. SANDIA

Filamento fotónico

MEDICINA

Ojo y cerebro

Los ojos expresan el estado de salud. Unos investigadores clínicos de Singapur han estudiado a 8000 pacientes: la probabilidad de que exhibiesen algún tipo de anomalía en los vasos sanguíneos de la retina se triplicaba en los que padecían discapacidades mentales derivadas de una lesión cerebral. Parece que esos daños oculares corresponden a daños vasculares análogos en el cerebro.

Un nuevo dispositivo determinaría, no la presencia de una lesión cerebral, sino la carencia de oxígeno en las neuronas. La anoxia las mata, pero es frecuente que no se manifieste en la presión sanguínea o en otros parámetros vitales; hoy por hoy, la única manera de descubrir esa dolencia consiste en conectar un monitor al corazón. Sarnoff Corporation, de Princeton, anuncia que su "oxímetro retiniano" mide el oxígeno cerebral con un procedimiento no invasivo: dispara haces de láser de baja energía (la sangre parece más brillante cuando lleva oxígeno). Esta empresa espera sacar una versión manual, que pasaría los ensayos clínicos con seres humanos el año que viene.

—Charles Choi

La retina informa de la salud del cerebro

SCOTT CAMAZINE, *Science News*

PLANETOLOGIA

El pasado se conserva en la Luna

La Tierra recibe, en forma de meteoritos, material de otros astros del sistema solar. Sin embargo, los ciclos hidrológicos y tectónicos no permiten que sea un buen archivo de la historia de los demás cuerpos celestes. La Luna, sin atmósfera, con una geología tranquila, debe de guardar muy bien las reliquias, degradadas ya en cualquier otra parte, que le han dejado los meteoritos que un violento episodio, el "gran bombardeo tardío", arrancó a los planetas interiores hace 3900 millones de años. Por eso, John C. Armstrong, Llyd E. Wells, ambos de la universidad de Washington, y Guillermo González, de la de Iowa, proponen que una misión lunar, a ser posible tripulada, explote esa información potencial. Han calculado la cantidad mediana de material ajeno depositada en la Luna: para un regolito (el polvo que recubre la Luna) bien mezclado, en una zona de diez kilómetros de lado, 20.000 kg de residuos de la Tierra, 180 de Marte y entre 1 y 30 de Venus.

CIENCIA DE LOS MATERIALES

Nanotubos largos



INST. POLITECNICO RENSSELAER

Los nanotubos de carbono pueden ya medir unos cuantos centímetros de longitud

Los más fantasiosos sueñan con las aplicaciones que la robustez y ligereza extraordinarias de los nanotubos de carbono podrían tener; imaginan cables de nanotubo que irían del suelo hasta alturas orbitales. Por desgracia, estas hebras huecas, de sólo unos nanómetros de diámetro, rara vez son mucho más largas que anchas, lo que limita su utilidad. El Instituto Politécnico Rensselaer ha construido ahora unos nanotubos de carbono de pared simple de 20 centímetros de longitud. Para ello han modificado el proceso químico ordinario, de depósito en fase de vapor; se ha empleado hexano como fuente del carbono y añadido ferroceno, tiopeno e hidrógeno bajo condiciones óptimas. Esta técnica produjo más y mejores nanotubos que los métodos anteriores.

—Charles Choi

Glucómica

Los azúcares desempeñan funciones críticas en muchas actividades celulares. Pese a ello, su estudio había quedado rezagado respecto a la investigación sobre genes y proteínas. Un retraso que empieza a recuperarse

Thomas Maeder

Descifrado el genoma humano, ha emergido en el horizonte con todo su atractivo el proteoma, conjunto de proteínas que nuestras células fabrican siguiendo las indicaciones de los genes. Cumple a las proteínas realizar la mayoría de las tareas de nuestro organismo. Parecería, pues, que la comprensión de su comportamiento debería traducirse en fuente de ideas para remediar los males que nos aquejan. Pero en las células hay algo más que genes y proteínas. Hidratos de carbono y lípidos desempeñan también funciones cruciales. Sin su conocimiento no se entiende la forma de operar del organismo ni cabe esperar paliar las enfermedades.

Los hidratos de carbono, en particular, realizan una asombrosa gama de tareas. No hace todavía mucho, se les reservaba una función de meros generadores de energía (en el caso de la glucosa y el glucógeno) o de elementos estructurales. Sabemos ya que se combinan con proteínas y lípidos en las superficies celulares; allí instalados, influyen en las comunicaciones intercelulares, el funcionamiento del sistema inmunitario, la capacidad patogénica de agentes infecciosos y la metástasis. Contribuyen a la identificación celular y al control del tráfico de las células móviles por todo el organismo. Tal es la ubicuidad de estas moléculas, que las células se presentan ante otras células y ante el sistema inmunitario revestidas de su manto.

Tras reconocer la importancia de los glúcidos en la salud y en la enfermedad, la ciencia básica y la industria farmacéutica se empeñan ahora en descubrir su estructura y actividad, con la vista puesta en la obtención de nuevos agentes terapéuticos. Las autoridades políticas se han percatado también de su interés. Por citar un ejemplo significativo, en octubre de 2001 los norteamericanos Institutos Nacionales de la Salud (NIH) concedieron una ayuda de 34 millones de dólares por un período de cinco años al Consorcio para la Glucómica Funcional, un grupo de 54 investigadores repartidos por todo el mundo involucrados en el desarrollo de una biblioteca de cadenas sintéticas de hidratos de carbono y una base de datos estructural. James C. Paulson, del Instituto de Investigación Scripps de La Jolla, dirige los trabajos.

Complejidad

Los azúcares simples —como la glucosa y la sacarosa, que están formadas por unos cuantos átomos de carbono, oxígeno e hidrógeno— reciben los nombres técnicos de monosacáridos, disacáridos, etcétera, de acuerdo con el número de unidades de azúcar que contengan. Si la cadena se prolonga, hablamos de oligosacáridos; los polisacáridos constituyen genuinas macromoléculas. Son glucoconjugados las moléculas integradas por hidratos de carbono asociados a proteínas (glucoproteínas) o a lípidos (glucolípidos).

El principal escollo con que se encontraban los bioquímicos del pasado residía en la penuria de herramientas para descifrar la estructura de las versiones complejas y para sintetizar sus moléculas de una manera reproducible. Los problemas arrancaban de la extraordinaria variabilidad estructural de los glúcidos. Los cuatro nucleótidos que intervienen en el ADN, y los veinte aminoácidos que forman las proteínas, se unen entre sí de manera lineal, a la manera de las cuentas de un rosario; se engarzan, además, mediante el mismo tipo de enlace químico siempre. Por el contrario, los azúcares simples, diez más o menos, que son los habitualmente presentes en los hidratos de carbono de los mamíferos, pueden unirse entre sí por diversos puntos y formar estructuras ramificadas complejas. Más aún, dos unidades enlazadas no siempre se orientan de la misma manera: a veces, una molécula cae perpendicular a uno de los planos de la otra unidad y, en otras ocasiones, perpendicular al plano opuesto.

Los cuatro nucleótidos del "alfabeto" del ADN pueden combinarse para producir 256 estructuras de cuatro unidades, diferentes entre sí. Los 20 aminoácidos de las proteínas pueden producir hasta 16.000 configuraciones de cuatro unidades. Pero los hidratos de carbono más simples del organismo pueden unirse, en

RANDI BEREZ



1. FARMACOLOGIA GLUCIDICA. Hace un año que salió al mercado Aranesp, una versión mejorada de un fármaco contra la anemia. Los hidratos de carbono añadidos a la molécula del fármaco original permiten que Aranesp prolongue su permanencia activa en el organismo.

teoría, para dar más de 15 millones de organizaciones distintas de cuatro componentes. Aunque en la naturaleza no se presentan todas estas combinaciones, las posibilidades resultan en verdad asombrosas.

Constituye, pues, un reto formidable determinar las secuencias de los componentes de los glúcidos complejos, para proceder luego a su síntesis. El progreso en la glucómica, más aún que en la genómica, dependerá de los avances que se den en técnicas moleculares de secuenciación y en bioinformática.

Posibilidades

De entrada, un mejor dominio de los glúcidos comportaría un mayor refinamiento de los tratamientos existentes. Fijémonos en la heparina, un fármaco común desde los años treinta. Se indica este glúcido anticoagulante para evitar que se formen trombos durante una intervención quirúrgica. Sin embargo, la mayoría de las preparaciones comerciales, extraídas del revestimiento intestinal del cerdo, son una mezcla heterogénea y pobremente caracterizada de compuestos constituidos por una cadena que contiene entre 200 y 250 unidades de monosacáridos. La potencia de la heparina y los efectos secundarios posibles varían no sólo de una compañía farmacéutica a otra, sino también de un lote al siguiente; ello exige comprobar sus propiedades conforme se va fabricando.

Los laboratorios farmacéuticos venden hoy versiones más pequeñas de la heparina, de masas moleculares bajas. Han recortado partes que no son necesarias para la actividad del fármaco, con el ahorro consiguiente de efectos secundarios. Pero también en esas nuevas presentaciones cuesta lograr partidas homogéneas.

Así las cosas, hace dos años, el equipo dirigido por Ram Sasisekharan, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, decidió poner en práctica las herramientas que habían desarrollado para descifrar la secuencia completa del centro activo de la heparina. (Es decir, la región responsable de la actividad biológica del compuesto.) Merced a la información obtenida, avanzan ahora los procedimientos de síntesis de heparinas más potentes y fiables, de masa molecular baja, al tiempo que se consigue encauzar sus propiedades farmacológicas para aplicaciones específicas.

El paulatino control de los hidratos de carbono debería igualmente repercutir en la eficacia de las proteínas producidas con técnicas de ADN recombinante. Para operar según es debido, ciertas proteínas han de llevar determinados glúcidos, agregados en lugares precisos. Pero las posibilidades técnicas no son a menudo suficientes. Consideremos la eritropoyetina, un fármaco recombinante que se administra para estimular la producción de hematíes en pacientes anémicos o sometidos a diálisis renal. Durante años, los laboratorios Amgen se vieron obligados a desechar hasta el 80 por ciento del fármaco que fabricaban, debido a una glucosilación inadecuada en virtud de la cual la molécula desaparecía en seguida de la sangre. La compañía encontró entonces la manera de añadir dos glúcidos adicionales a los habituales en la eritropoyetina. La nueva versión, comercializada con el nombre de Aranesp, permanece en la sangre mucho más tiempo que el fármaco primitivo, por lo que requiere una dosificación menos frecuente.

Además de mejorar fármacos ya existentes, importa ahondar en los hidratos de carbono que permitan introducir terapias innovadoras en múltiples patologías. En unos casos, tales fármacos podrían consistir en glúcidos o glucoconjugados; en otros, podrían ser moléculas que influyan sobre las interacciones entre hidratos de carbono y otras moléculas, incluidas las interacciones con enzimas (catalizadores biológicos) que controlan la síntesis o degradación de las moléculas que portan azúcares.

Contra las infecciones

Entre otros ámbitos de interés, la investigación centra su atención en las enfermedades infecciosas, dominio en el que los fármacos glucídicos han cosechado ya un éxito extraordinario. Sírvanos de botón de muestra la vacuna dirigida contra el *Hemophilus influenzae* del tipo b (Hib). Su administración ha librado a muchos de la meningitis, letal a menudo, causada por el Hib. Al presentar un glúcido de la bacteria ante el sistema inmunitario, la vacuna actúa como cebador de éste para que destruya de inmediato al microorganismo en cuanto penetre en el cuerpo. Una primera versión que tenía sólo una cadena de hidrato de carbono del Hib resultó ineficaz. Pero desde finales de los años ochenta contamos ya con preparaciones de glucoconjugados, sumamente eficaces, en las que el azúcar está unido a una proteína que activa la respuesta inmunitaria. Hay en estudio otras vacunas con glucoconjugados para enfermedades infecciosas, incluida la que debe proteger contra infecciones de *Staphylococcus aureus* en pacientes hospitalizados.

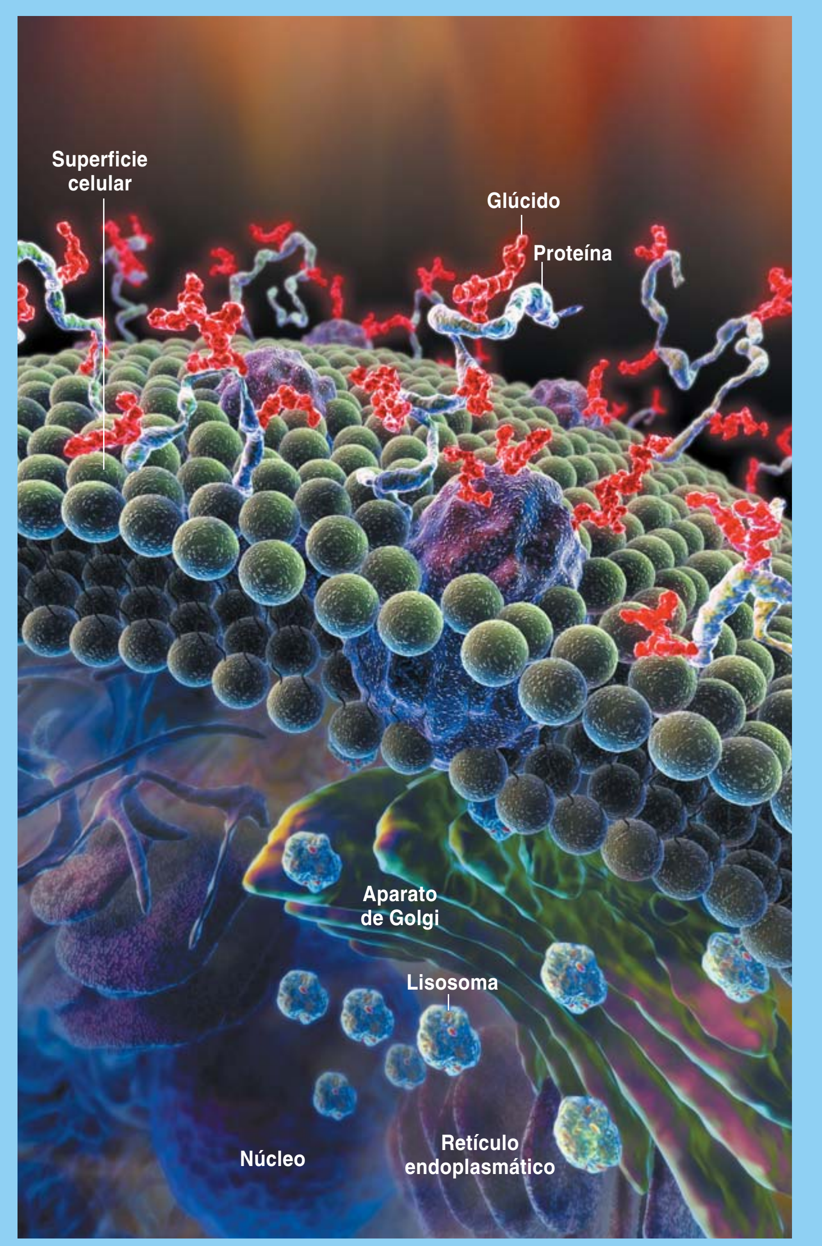
Diversos organismos patógenos se sirven de hidratos de carbono para reconocer e interaccionar con sus células huésped. Algunos fármacos existentes y otros en elaboración contienen glúcidos o moléculas que remedan a aquéllos con el fin de bloquear dicho contacto. El virus de la gripe, por ejemplo, penetra en las células que infecta, después de unirse con el ácido siálico que sobresale de las glucoproteínas en la superficie celular. La unión a ese

Resumen/*Hidratos de carbono*

- Los glúcidos modifican muchas proteínas y lípidos de las superficies celulares y participan en los procesos relacionados con la inmunidad y la comunicación intercelular. Desempeñan también una función activa en numerosas patologías, de las infecciones víricas al cáncer.
- Se van superando los obstáculos que dificultan el desciframiento de las estructuras de hidratos de carbono complejos, así como los que se interponen en su síntesis.
- Los avances abren la puerta a nuevas medicinas para enfermedades muy diversas.

Glucofármacos en acción

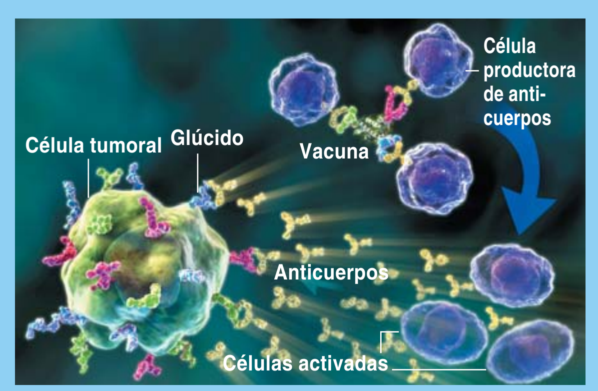
Los hidratos de carbono se agregan a muchas proteínas y lípidos de la superficie de las células (*abajo*). Las células añaden glúcidos a través de reacciones enzimáticas que se desarrollan en el retículo endoplasmático y el aparato de Golgi; en el interior de los lisosomas degradan los glucoconjugados. Las figuras de la derecha e inferior ilustran algunas de las ideas terapéuticas surgidas del progreso de nuestro conocimiento sobre la estructura, función y procesamiento de hidratos de carbono en el organismo.



ENFOQUES TERAPEUTICOS

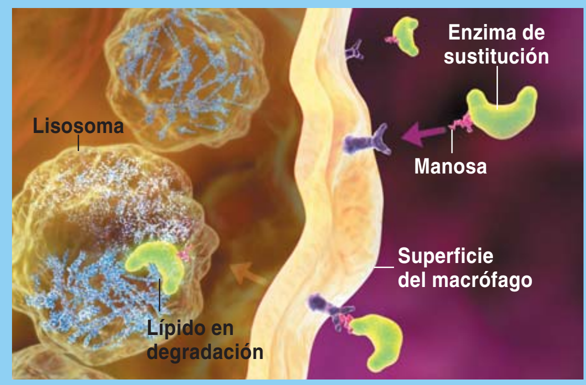
Lucha contra el cáncer

Las células tumorales presentan a menudo versiones insólitas de hidratos de carbono. Uno de los tratamientos propuestos (*abajo*) los incorporaría en una vacuna, cuya aplicación determinaría que el sistema inmunitario produjera anticuerpos capaces de reconocer los glúcidos seleccionados en las células cancerosas, para destruirlos en consecuencia.



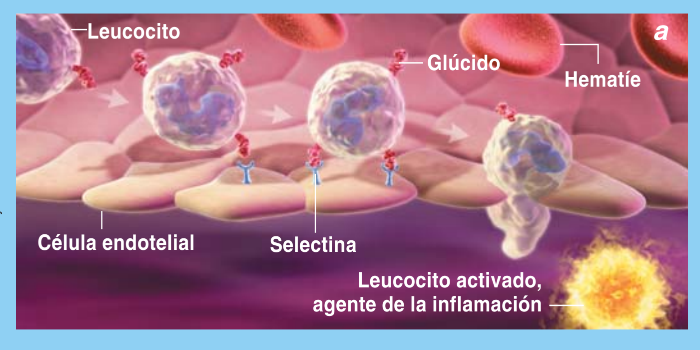
Mejoría de las enfermedades de almacenamiento lisosómico

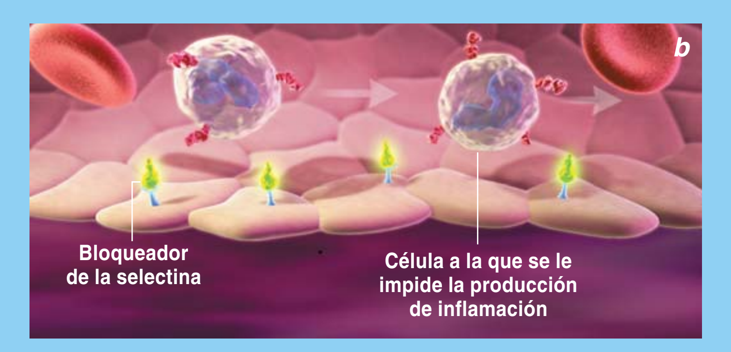
Muchas enfermedades hereditarias se producen porque resulta deficiente la enzima necesaria para degradar lípidos que portan glúcidos en los lisosomas. Para combatir la enfermedad de Gaucher (*abajo*) se emplea un fármaco que consta de una enzima de sustitución; ésta se ha modificado para que presente el azúcar manosa, que encauza la enzima hacia los macrófagos, células gravemente afectadas por la carencia de una enzima funcional.



Bloqueo de la inflamación

Se produce la inflamación cuando los leucocitos invaden los tejidos (*abajo, a*). Para salir de la sangre, las células deben unirse a las selectinas, a través de un hidrato de carbono, en las células endoteliales que tapizan las paredes de los vasos. Se prevé que los fármacos antiinflamatorios en estudio eviten la unión de los leucocitos a las selectinas (*b*).





JEFF JOHNSON *Hybrid Medical Animation*

Técnicas empleadas por la glucómica

Los avances instrumentales han posibilitado el desarrollo de fármacos constituidos por glúcidos o que actúan como tales

Los avances registrados en la secuenciación y procesamiento de datos, de manifiesta repercusión en las ciencias biomédicas, podrían favorecer el desarrollo del nuevo campo de la glucómica. Conforme los expertos en fármacos profundizan más en la estructura y función de los hidratos de carbono complejos, así como en el control de su síntesis, van surgiendo nuevas ideas para el tratamiento de afecciones relacionadas con los glúcidos.

Una secuenciación directa del tipo habitual de gen lineal o secuencias de proteínas, en que las subunidades se unen enzimáticamente y se identifican una por vez, resulta impensable en hidratos de carbono que se ramifican de forma compleja y donde se requiere la determinación de cada rama. Para salvar ese escollo, Ram Sasisekharan, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ha optado con su grupo por otra vía: trabajan simultáneamente de lo global a lo específico y de lo particular a lo general, buscando la respuesta en el medio. Primero determinan el tamaño de una molécula y usan un algoritmo de ordenador para generar una lista maestra del ingente número de secuencias teóricamente posibles, incluidas las de cada ramificación dentro de cada una de las estructuras no lineales. Descartan luego posibilidades: comprobando en qué proporciones relativas están presentes los monosacáridos o examinando la susceptibilidad de la molécula a enzimas que rompen uniones entre unidades específicas o en determinados puntos de ramificación.



RANDI BEREZ

RAM SASISEKHARAN sentado ante una unidad secuenciadora de glúcidos. Tras la degradación enzimática de un glúcido complejo, un equipo avanzado de cromatografía de líquidos de alta presión (*en el carro*) clasifica los fragmentos resultantes; un espectrómetro de masas (*a la derecha*) identifica los componentes de los fragmentos. Los ordenadores analizan después los resultados de ambos procedimientos para llegar a la secuencia completa de los glúcidos unitarios que integran la molécula compleja.

Por su parte, la síntesis *in vitro* de hidratos de carbono ha comenzado a andar. Las proteínas se leen a partir de un "plano" que puede utilizarse para generar un número ilimitado de copias. Para los glúcidos no existen planos. La construcción de oligosacáridos demanda la intervención de diferentes enzimas que han de operar en serie. Cuando las enzimas necesarias se encuentran en la naturaleza, pueden utilizarse para componer bloques específicos en la orientación deseada. Pero si se carece de tales enzimas, deben ensayarse otras alternativas, más laboriosas. Peter H. Seeberger, del MIT, ha desarrollado un método para unir oligosacáridos que se inspira en el ideado por R. Bruce Merrifield, de la Universidad de Rockefeller, para la síntesis de proteínas. Los hidratos de carbono se unen en puntos donde existe un grupo OH (hidroxilo). Se empieza, pues, a anclar un monosacárido en una unidad de un polímero; se deja velado el resto de los grupos hidroxilo excepto el que ha servir de enlace. Se expone, luego, el primer azúcar a un segundo, parcialmente cubierto; se permite su mutua interacción. Después, se levanta el velo de un nuevo sitio OH, para iterar el proceso, añadiendo un nuevo glúcido. La mayoría de los enlaces y ramificaciones pueden hacerse ahora de manera muy fiable, aunque el proceso no es todavía tan simple como la síntesis rutinaria automatizada de péptidos y moléculas de ADN. Los polisacáridos logrados hasta la fecha en el laboratorio de Seeberger alcanzan ya una longitud de 12 unidades; se tarda 16 horas en constituirlos. Por fortuna, un buen número de hidratos de carbono importantes, incluidos los que ayudan a distinguir la superficie de una célula de la de otra, caen dentro de esta gama. Moléculas largas pueden enlazarse junto a las unidades modulares menores.

El llamado método sintético de "un solo golpe" requiere una planificación minuciosa previa, si bien su ejecución resulta más sencilla. Se introducen todos los ingredientes en el tanque de reacción; se determina una secuencia de reacciones preprogramada por el grado de reactividad de los hidratos de carbono, protegidos de una manera diferenciada. Los enlaces más reactivos se forman en primer lugar y los menos reactivos al final, y así el orden de intensidad de la reacción determina la secuencia de la molécula postrera.

Se trabaja también en la puesta a punto de métodos para determinar las diversas funciones de un glúcido. A menudo hay que recurrir a animales de experimentación en los que se ha inducido la síntesis o carencia de un hidrato de carbono. Tras observar qué es lo que se resiente en razón de la presencia de un glúcido defectuoso, o de su total ausencia, se puede comprender cuál es la función normal de la molécula en cuestión.

—*T.M.*

azúcar abre las "puertas" celulares, dejando que el virus penetre y se replique en el interior de la célula. Cuando los virus recién formados emergen entonces de la célula, pueden quedar atrapados por el mismo azúcar y han de desplegar la enzima neuraminidasa para que corte el enlace con el azúcar y queden liberados. Dos fármacos, comercializados con los nombres de Tamiflu y Relenza, acortan la duración de la gripe al unirse fuertemente al centro activo de la enzima, evitando así su acción sobre el ácido siálico. Neutralizada la neuraminidasa, no le será fácil al virus propagarse e infectar a otras células.

En el caso del virus de la gripe, el fármaco inutiliza al glúcido genuino. Accede así a la enzima e inhibe su actividad, en un proceso de inhibición competitiva. La aplicación de ese mecanismo empleando análogos sintéticos de los glúcidos problemáticos podría revestir interés en la lucha contra otras enfermedades infecciosas. Así, en el caso de *Helicobacter pylori*, bacteria que produce úlceras de estómago e inflamación; se instala ésta en el organismo al unirse a un glúcido de la superficie de las células que tapizan el estómago. O en el de *Shigella disenteryae*, bacteria responsable de epidemias de diarrea mortales, que sintetiza una toxina que se une a un glúcido de las células intestinales. Moléculas imitadoras de azúcares, que actúan de señuelos, al unirse a *H. pylori* o a la toxina de *S. disenteryae*, y evitan con ello su anclaje celular, constituyen ya una promesa en las pruebas de laboratorio.

Suele seguirse una estrategia similar en la lucha contra el choque séptico (una afección de la circulación a menudo fatal), causado por una bacteria gram negativa. (Las bacterias se denominan "gram positivas" o "gram negativas" según su reacción ante un colorante determinado.) Se produce el choque séptico cuando las bacterias mueren —a raíz de un tratamiento con antibióticos— y liberan un glucolípido, el lípido A, en el torrente sanguíneo desencadenando una respuesta inflamatoria catastrófica. La administración de un análogo del lípido A, que no inste una drástica respuesta inmunitaria, podría reducir o eliminar el choque al actuar de cebo y mantener las células del sistema inmunitario alejadas del lípido A genuino del organismo. Esos sucedáneos podrían limitar también la replicación bacteriana y la producción de lípido A.

Casi todas las enfermedades infecciosas están producidas por virus, bacterias, hongos o parásitos. Sin embargo, algunas afecciones cerebrales, pensemos en la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, podrían deberse a priones, proteínas mal plegadas. De acuerdo con las investigaciones de John Collinge, del Hospital St. Mary de Londres, la resistencia peligrosa que oponen los priones cabría atribuirla a una glucosilación inadecuada de las proteínas, que se tornan así protegidas contra la degradación enzimática fisiológica.

Restauración del equilibrio

Los fármacos basados en hidratos de carbono podrían tener también un papel en la lucha contra una serie de enfermedades no infecciosas. Nos referimos, en particular, a las afecciones marcadas por un exceso de inflamación. Ante una herida o infección, las células endoteliales que tapizan los vasos sanguíneos comienzan a desplegar una batería de selectinas, proteínas que se unen a hidratos de carbono. Las selectinas de las células endoteliales se enlazan débilmente a sialil Lewis x (hidratos de carbono específicos) en la superficie de los leucocitos circulantes del sistema inmunitario. Como una pelota de tenis que rueda sobre una cinta de velcro, los leucocitos tropiezan en la pared del vaso y se frenan lo suficiente para emigrar fuera de la pared hacia el tejido lesionado, donde se instalan para contener la amenaza. Esa respuesta, importante para la defensa de la salud, puede convertirse en causa de enfermedad, si llega a hacerse crónica o peca de desproporcionada. Las sustancias que impiden el contacto entre sialil Lewis x y selectinas se hallan hoy en fase de desarrollo para su aplicación como fármacos antiinflamatorios potenciales.

La investigación explora también estrategias glucídicas para combatir el cáncer. Sabido es que las células malignas despliegan a menudo hidratos de carbono incompletos o anormales en su superficie. Se pretende, en consecuencia, incorporar esos azúcares en vacunas que induzcan al sistema inmunitario a reconocer y destruir las células cancerosas que lleven tales glúcidos.

A este respecto, el grupo de Sasisekharan, del MIT, demostró recientemente en el ratón que los heparansulfatos, azúcares que se encuentran en las células normales y malignas, pueden potenciar o limitar el crecimiento canceroso; depende que ocurra lo uno o lo otro de la forma en que dichos glúcidos se degraden o eliminen por las enzimas celulares. Este descubrimiento ha llevado a sugerir un tratamiento del cáncer mediante la administración de fragmentos del azúcar frenadores del crecimiento o mediante la administración de alguna sustancia que hiciese que las propias células cancerosas produjeran una cantidad más saludable del fragmento deseable.

De la letalidad del cáncer es culpable la formación de metástasis. Se da ese fenómeno cuando las células malignas se desprenden del tumor y horadan el tejido conjuntivo para adentrarse en el torrente sanguíneo. A través de la sangre (o la linfa) viajan hasta tejidos alejados, donde abandonan la circulación y establecen nuevos tumores. Una de las moléculas que parecen estar vinculadas con ese curso es una proteína enlazada a un hidrato de carbono. La galectina-3, así se llama la proteína, fomenta además las metástasis con su participación en la angiogénesis (formación de nuevos vasos sanguíneos): ayuda a las células tumorales a resistir las señales de autodestrucción. Para bloquear tales efectos dañinos, los laboratorios Glyco-Genesys están realizando pruebas clínicas con un hidrato de carbono derivado de la pectina del cidro que se une a la galectina-3.

Para formar glucoconjugados las células siguen una serie de pasos, durante los cuales diversas enzimas añaden o eliminan grupos de glúcidos. Intervienen luego ciertas enzimas situadas en el interior de lisosomas, compartimentos rodeados por membranas, que degradan los glu-

Terapias actuales y futuras

Breve relación de fármacos glucídicos, comercializados o en proceso de desarrollo. Algunos son glucoconjugados: constan de glúcidos asociados a péptidos (cadenas cortas de aminoácidos), proteínas o lípidos.

FARMACO	DESCRIPCION	ETAPA DE PRUEBAS CLINICAS
CEREZYME (imiglucerasa)	Enzima degradante de glucolípidos; compensa la deficiencia enzimática responsable de la enfermedad de Gaucher	Comercializado
VANCOCIN (Vancomicina)	Antibiótico glucopeptídico que se usa contra infecciones resistentes a antibióticos; inhibe la producción de peptidoglucano, un componente de la pared bacteriana	Comercializado
VEVESCA (OGT 918)	Sucedáneo de hidrato de carbono que limita la síntesis del glucolípido acumulado en la enfermedad de Gaucher	Las autoridades sanitarias están analizando los datos de las pruebas de fase III, es decir, las realizadas con muestras poblacionales muy extensas
VACUNA GMK	Vacuna que contiene el gangliósido glucídico GM2; desencadena la respuesta inmunitaria contra células cancerosas portadoras de GM2	En pruebas de fase III para el melanoma
STAPHVAX	Vacuna que contiene un azúcar bacteriano acoplado a una proteína; se intenta con ella combatir las infecciones hospitalarias de *Staphylococcus*	En pruebas de fase III para pacientes con enfermedad renal
BIMOSIAMOSE (TBC1269)	Sucedáneo de hidrato de carbono, para frenar a las selectinas de las paredes de los vasos y evitar que promuevan la inflamación	Pruebas de fase II para el asma y la psoriasis
GCS-100	Glúcido que se opone a la acción de una glucoproteína de los tumores	En pruebas de fase II para cáncer de páncreas y cáncer colorrectal
GD0039 (swainsonina)	Sucedáneo de hidrato de carbono que bloquea la producción de glúcidos necesarios para la metástasis	En pruebas de fase II para el cáncer de riñón
PI-88	Glúcido que inhibe el crecimiento de factores responsables de la angiogénesis e impide la acción de una enzima implicada en las metástasis	En pruebas de fase II para el mieloma múltiple (un cáncer de la sangre); en fases I/II (seguridad y eficacia) para el melanoma
UT231B	Sucedáneo de hidrato de carbono que impide que el virus de la hepatitis C infecte las células	Han concluido ya las pruebas de fase I (seguridad)

colípidos y las glucoproteínas inservibles. En las enfermedades de Gaucher y Tay-Sachs acontece que la enzima lisosómica involucrada es defectuosa, con la consiguiente acumulación destructiva de glucolípidos en el organismo. La enfermedad de Gaucher puede frenarse en la actualidad por la administración de la enzima normal, una vez modificada de suerte tal que despliegue un hidrato de carbono que la encamine hacia el tipo celular específico. En concreto, la molécula de manosa dirige la enzima que degrada glucolípidos hacia los macrófagos, que son especialmente sensibles a la pérdida de la enzima.

La terapia enzimática tiene que administrarse por vía intravenosa. Por tratarse de proteínas, las enzimas se degradarían en el tracto digestivo si se administrasen por vía oral. Más aún, las enzimas no atraviesan la barrera hematoencefálica y, por tanto, no pueden combatir las lesiones de las células nerviosas del cerebro. La investigación se centra, pues, en limitar la síntesis de glucolípidos mediante la reducción de la cantidad producida en primer lugar; en particular, a través de la administración de compuestos pequeños, así sucedáneos glucídicos, que estén capacitados para inhibir las enzimas implicadas en la síntesis de glucolípidos. Uno de estos fármacos, desarrollado por Oxford GlycoSciences, se administraría por vía oral. Se ha comprobado la eficacia del mismo en las pruebas con humanos.

De la investigación glucómica cabría incluso esperar que aporte las bases para posibles trasplantes de órganos de cerdo a los humanos. Entre los obstáculos que se interponen en el camino de los xenotrasplantes destaca uno: el tejido del cerdo presenta un hidrato de carbono que no se encuentra en los tejidos humanos. Su introducción despertaría una reacción rápida de destrucción del injerto por el sistema inmunitario del receptor. Este impedimento podría superarse tal vez mediante la administración de sucedáneos de azúcares que sirvieran de señuelo o mediante la manipulación genética de cerdos, para que sus enzimas no promuevan el glúcido indebido.

El desarrollo de fármacos glucídicos ha de hacer frente a graves dificultades, en especial cuando se trata de preparados que comprenden hidratos de carbono genuinos. El sistema digestivo considera alimentos a los azúcares, por lo que tendrían que empaquetarse para evitar su degradación, o inyectarse. En la sangre, las enzimas podrían degradarlos también. Además, puesto que los hidratos de carbono operan mediante su unión lábil a muchos sitios y no por enlaces vigorosos a unos pocos, habría que administrarlos en grandes cantidades. Con todo, ninguno de estos obstáculos parece insuperable.

Bibliografía complementaria

EMERGING THEMES IN MEDICINAL GLYCOSCIENCE. Kathryn M. Koeller y Chi-Huey Wong en *Nature Biotechnology*, vol. 18, págs. 835-841; agosto de 2000.

CARBOHYDRATES AND GLYCOBIOLOGY. Informe especial en *Science*, vol. 291, págs. 2337-2378; 23 de marzo de 2001.

THE BITTERSWEET PROMISE OF GLYCOBIOLOGY. Alan Dove en *Nature Biotechnology*, vol. 19, págs. 913-917; octubre de 2001.



1. SI LAS EMPRESAS adoptaran la técnica de la óptica en espacio libre, quienes residiesen en sus cercanías podrían acceder de un modo asequible a servicios multimedia de banda ancha.

Láser en el kilómetro final

Los modernos servicios multimedia en banda ancha pueden llegar directamente a viviendas y empresas por medio de láseres infrarrojos de corto alcance

Anthony Acampora

Imagínese una red urbana de distribución de agua que no abastece locales y viviendas porque las tuberías carecen de la longitud suficiente. Esta situación se parece mucho a la que hoy se da en la red de transmisión de datos de alta velocidad. Se han invertido muchos miles de millones de euros en construir redes básicas de fibra óptica que lleven a los ordenadores domésticos y profesionales servicios multimedia de calidad realmente elevada; pese a ello, se han quedado cortas: en Estados Unidos, por ejemplo, les falta un poco menos de un kilómetro para llegar a nueve de cada diez empresas de más de 100 empleados. No obstante el incesante crecimiento de la demanda, tardan en hacerse realidad las halagüeñas perspectivas: la supresión de los retrasos en la navegación por la Red y en el acceso a bibliotecas de datos, un comercio electrónico más ágil, emisiones de vídeo que pueden contemplarse en el acto y de seguido, servicios de petición de vídeo, videoconferencias, transferencias de imágenes clínicas en tiempo real, interconexiones de empresas que posibiliten el compartir trabajos, una variedad de transacciones entre entidades comerciales. Todo esto no ha despuntado todavía; yace enterrado bajo las calzadas y aceras de las ciudades.

El problema es bien sencillo: los conductores de cobre y cables coaxiales que conectan los sistemas de teléfonos y televisión por cable a los edificios carecen de la capacidad necesaria (del orden de gigabits por segundo) para transportar servicios y aplicaciones de gran anchura de banda. Además, costaría demasiado instalar los puentes de fibra óptica requeridos para conectar millones de usuarios a la red básica de fibra óptica (entre 60.000 y 300.000 euros por kilómetro). Por tales razones hoy sólo se utiliza del 2 al 5 por ciento de esta red de cobertura nacional.

Aunque diversas técnicas de transmisión de datos que no emplean la fibra, entre ellas el radioenlace por microondas, las líneas de abonado digitales y los módems de cable, intentan materializar la conectividad en banda ancha, muchos expertos creen que ninguna cuenta con más probabilidades de éxito que la óptica en el espacio libre (FSO, *free-space optics*): la comunicación óptica, pero sin fibra. Inventada en los años setenta, se ha reavivado en fechas recientes. Los elementos básicos de este sistema son los transceptores (transmisores-receptores) de láser infrarrojos de baja potencia, que transmiten datos en ambos sentidos a velocidades de gigabits por segundo. Varios proveedores han instalado ya en distintas partes del mundo sistemas de FSO reducidos.

Los láseres infrarrojos de baja potencia operan en una banda del espectro de frecuencias no sujeta a licencia; están diseñados —o se pueden diseñar— de modo que no supongan riesgo alguno para el ojo humano. Por desgracia, la escasa potencia de estos láseres limita su alcance. En función del tiempo que haga, los enlaces por FSO abarcan desde unas pocas manzanas urbanas hasta un kilómetro, distancia suficiente para un tráfico de banda ancha, en ambos sentidos, entre la red básica y un buen número de usuarios finales. Para remediar la fuerte reducción del alcance que causa el mal tiempo —sobre todo la niebla espesa— en unos dispositivos que dependen de la visibilidad directa, puede establecerse una red en la que cada nodo transceptor óptico (cabecera de enlace) se comunique con varios otros nodos cercanos. Esta topología "de malla" garantizaría la retransmisión fiable de enormes cantidades de datos desde unos pun-

CHIP SIMONS

tos de difusión centralizados a poblaciones, ciudades o regiones enteras.

Los equipos de FSO que se han comercializado proporcionan velocidades de datos muy superiores a las que ofrecen las líneas de abonado digitales o los cables coaxiales —de 10 megabit a 1,25 gigabit por segundo—, más que suficientes para la mayoría de los servicios y aplicaciones de gama alta en banda ancha. Además, los diodos láser más avanzados ya disponibles en el mercado operan a un ritmo tal, que permitiría transmitir información a velocidades todavía mayores, llegando a los 9,6 gigabit por segundo. Si bien estos dispositivos aún no están adaptados para el uso en la FSO, un sistema de ese tipo podría transmitir impulsos ópticos de sólo 100 picosegundos (100 billonésimas de segundo) de duración.

Los sistemas ópticos en el espacio libre cuestan entre tres y diez veces menos que las instalaciones convencionales de fibra óptica subterránea. Por si fuera poco, enterrar el cableado lleva de seis a doce meses, mientras que el enlace FSO se instala y pone en servicio en pocos días. No es de extrañar, pues, que cerca de una docena de compañías estén desarrollando la técnica FSO. Si las cosas van como sus promotores predicen, esta industria podría pasar de facturar en el año 2000 unos 120 millones de euros a superar los 2000 millones en 2006, según un estudio dirigido por Strategis Group, consultora de telecomunicaciones de Washington, D.C.

Salvar el último kilómetro

La óptica en el espacio libre se vale de aparatos y técnicas ideados originalmente para los sistemas de fibra óptica por cable, los mismos que ahora se pretende complementar. Las señales electrónicas que contienen información digital (los "1" y los "0" del lenguaje binario de los ordenadores) se envían por medio de un transmisor de diodo láser infrarrojo, montado sobre un tejado o en una ventana, que convierte cada "1" lógico en un estrecho impulso de energía óptica y cada "0" en una ausencia de impulso. A esta modulación digital de la señal óptica se la denomina señalización todo/nada. Se mejora el rendimiento de la transmisión distribuyendo el tráfico en paquetes de datos independientes, que se direccionan y transmiten por separado. Además, el sistema FSO admite la multiplexación por división en longitud de onda (WDM), técnica que transporta por una sola vía óptica decenas de canales de señal independientes, siempre que cada uno vaya codificado en una longitud de onda ligeramente distinta de la de los demás.

Los impulsos ópticos emitidos por el diodo láser de 850 o 1550 nanómetros atraviesan después una lente de enfoque y se envían al exterior en forma de haz luminoso colimado, como el que genera una lámpara de destellos. Pese al enfoque por la lente, la potencia del haz se dispersa con la distancia; cuando una parte de la luz transmitida incide en la lente de la abertura de un receptor (también situado en un tejado o en una ventana), la potencia óptica captada se enfoca a un fotodetector, que convierte los impulsos en una señal eléctrica débil. A continuación, esta señal se amplifica y regenera en un receptor electrónico muy sensible, lo que completa el enlace de transferencia de datos (*véase el recuadro* "Completar la conectividad").

Aunque el haz de infrarrojos transmitido sea estrecho, no por ello deja de abrirse; cuando llega al extremo receptor del enlace forma un cono de bastante anchura. El grado de dispersión del haz viene determinado por el tamaño de la lente transmisora, variando en razón inversa al diámetro de la misma. De ahí que la cantidad de energía que realmente alcanza la lente colectora caiga deprisa con la distancia (varía en razón inversa al cuadrado de ésta). Para unos determinados valores de la velocidad de transmisión de datos, la potencia óptica transmitida, la sensibilidad óptica del receptor y el tamaño de la lente receptora, la divergencia del haz impone una distancia máxima a la cual puede funcionar el enlace óptico.

Para aumentar esa distancia hay que utilizar lentes transmisoras de mayor diámetro que reduzcan la dispersión del haz; de esa manera incide una proporción mayor de energía óptica en la lente receptora. Al estrechar el haz, sin embargo, las minúsculas variaciones del blanco, originadas por las oscilaciones del edificio y la dilatación o contracción de los materiales de construcción, obligan a introducir medios de seguimiento automático en ambos extremos del enlace, con el consiguiente aumento de la complejidad y del coste. Hay sistemas de seguimiento activos que utilizan plataformas mecánicas móviles o espejos articulados para apuntar el afilado haz hacia las lentes receptoras y para que la abertura receptora mire al transmisor. Mediante ajustes regulares controlados por realimentación se mantienen el transmisor y receptor en la orientación correcta.

Aplicaciones de la óptica en el espacio libre

- **Acceso en el último kilómetro:** enlaces de datos de alta velocidad conectan usuarios finales —empresas y particulares— con proveedores de servicios de Internet y otras redes de fibra metropolitanas y de área extensa.
- **Telefonía móvil:** medios para transportar el tráfico de la telefonía celular desde las torres de antena locales a las instalaciones conectadas a la red telefónica pública conmutada.
- **Conectividad de empresas:** interconexión fácil de los segmentos de red de área local instalados en los distintos edificios de una empresa.
- **Reserva para la fibra:** enlaces redundantes de bajo coste que sirven de reserva a la fibra óptica, sustituyendo a un segundo enlace por cable de fibras enterrado.
- **Aceleración del servicio:** servicio de alta velocidad transitorio para clientes que esperan el tendido de la infraestructura de fibra óptica. Instalación de una red de comunicaciones de emergencia.

Completar la conectividad

EXTENSION DE LA BANDA ANCHA AL KILOMETRO FINAL

Instalando en los edificios nodos ópticos de espacio libre (FSO) con multitransceptores (*debajo y a la derecha*), una red de transmisión de datos de corto alcance con estructura de malla y enlaces bidireccionales por láser extendería la distribución de datos en banda ancha desde las ciudades ya atendidas a otras poblaciones, urbanizaciones e incluso regiones.

Transceptores múltiples

NODO OPTICO DE ESPACIO LIBRE

Red básica nacional de fibra optica

TORRE DE DISTRIBUCION CENTRAL

CENTRO URBANO

URBANIZACION

BARRIO

PARQUE EMPRESARIAL

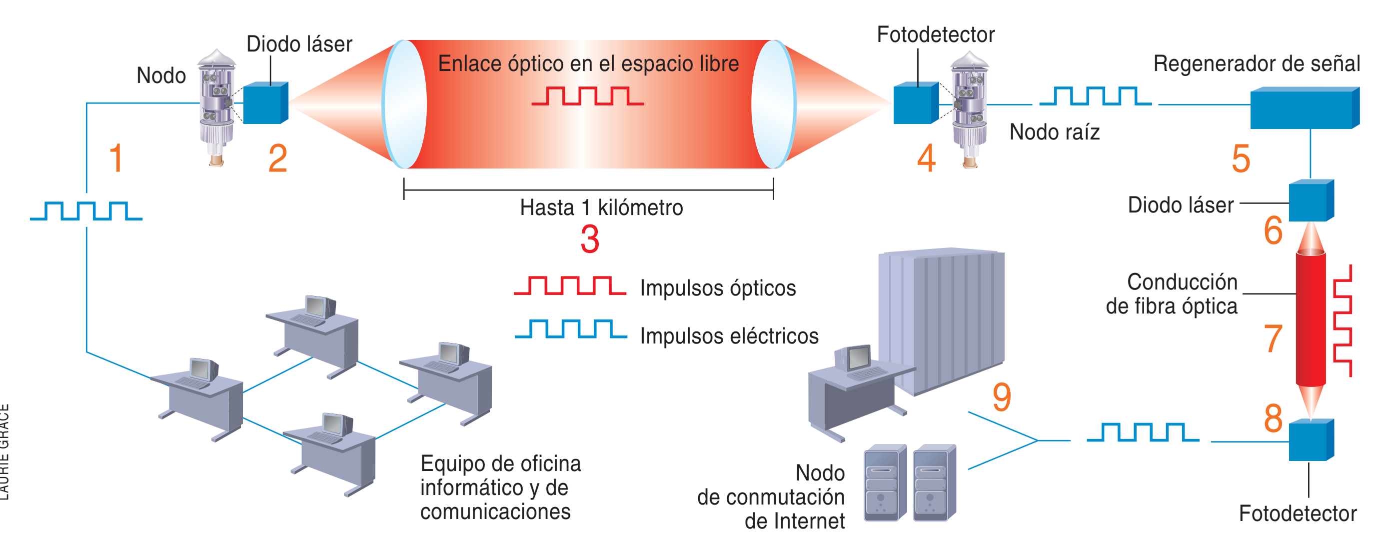
ZONA INDUSTRIAL

ENLACE OPTICO DE ESPACIO LIBRE CON LA RED BASICA DE FIBRA OPTICA

Transmitir datos en banda ancha dentro de un área residencial a velocidad elevada es la función primordial de un enlace FSO. Estos enlaces pueden proporcionar la conexión de "último kilómetro" con la red de fibra óptica de alta capacidad ya tendida. Los datos codificados para las aplicaciones y servicios de banda ancha que se ejecutan en equipos de oficina digitales (y en el futuro, en sus homólogos domesticos) se envían a un nodo transceptor FSO montado en un tejado o ventana (*1*).

El diodo láser del transceptor convierte los datos en impulsos ópticos infrarrojos, colimados por una lente (*2*) y dirigidos en haz (*3*) a otro nodo FSO (en este caso, un nodo raíz conectado a la conducción de fibra óptica) fijado en un edificio próximo. La lente receptora de ese transceptor enfoca los impulsos ópticos a un fotodetector, que los restituye como impulsos eléctricos (*4*). Los impulsos son luego amplificados y depurados por un regenerador de señal (*5*).

A continuación, las señales eléctricas se envían por un hilo a otro diodo láser, que las codifica ópticamente (*6*) para transmitirlas por un cable de fibra óptica que forma parte de la red básica nacional (*7*). En el extremo de dicho cable, un fotodetector (*8*) reconvierte las señales en impulsos eléctricos que utilizarán los ordenadores y servidores de un nodo de conmutación principal de Internet (*9*); éste enlaza con los proveedores de aplicaciones y servicios de banda ancha.



LAURIE GRACE

Perdidos en la niebla

La sensibilidad a la niebla ha retrasado el lanzamiento comercial de los sistemas ópticos en espacio libre. Es cierto que la niebla (y en un grado mucho menor, la lluvia y la nieve) produce una notable caída de la potencia óptica recibida y, por tanto, limita considerablemente el alcance máximo de un enlace de FSO. El coeficiente de atenuación óptica aumenta exponencialmente con la distancia. En una niebla que no sea demasiado densa, la señal óptica pierde el 90 por ciento de su intensidad cada 50 metros. Esto implica que a los 100 metros se habrá perdido el 99 por ciento de la energía y a los 150 metros el 99,9 por ciento. Para que un enlace óptico en el espacio libre resulte practicable tendrá, pues, que estar diseñado con un "margen de enlace" especificado, es decir, un exceso de potencia óptica al que pueda recurrirse para traspasar la niebla cuando sea necesario.

Dado un margen de enlace determinado, toma sentido otro parámetro de medida: la disponibilidad del enlace, la fracción del tiempo de funcionamiento total durante la cual el enlace falla a causa de la niebla u otras interrupciones físicas. Dependiendo de la aplicación, se establecen objetivos de disponibilidad dispares. En la red interna por FSO de una compañía privada (la conexión, por ejemplo, de dos despachos de la misma empresa situados en diferentes edificios) puede aceptarse un 99,9 por ciento de tiempo útil, que correspondería a nueve horas inservibles por año.

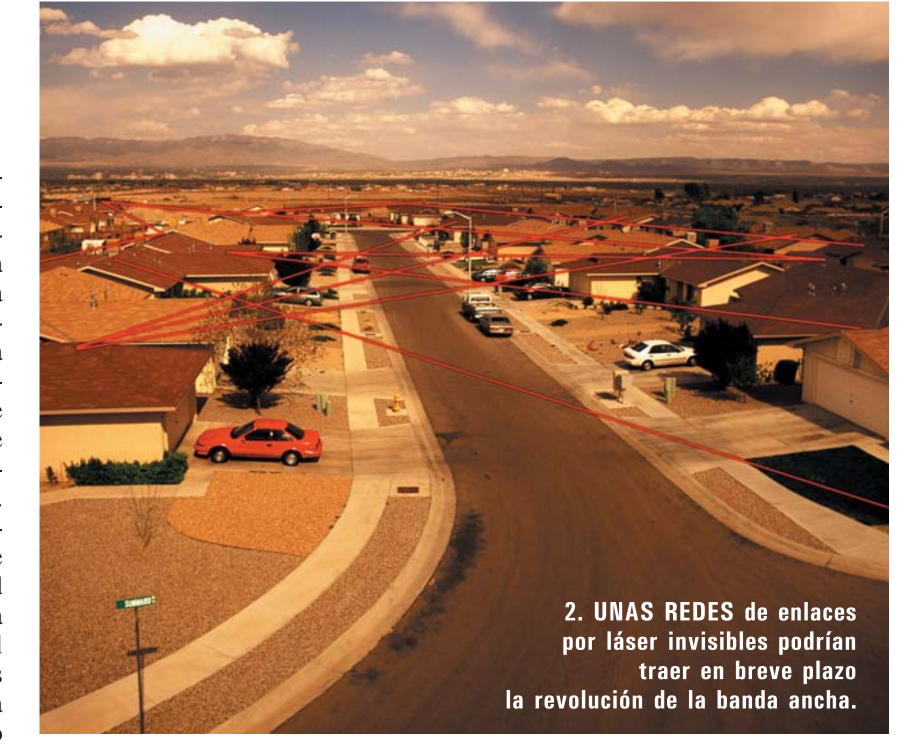
Por el contrario, los proveedores públicos de señal necesitan que el enlace esté disponible para los clientes preferentes el 99,999 por ciento del tiempo (como se dice en las telecomunicaciones, la marca de los cinco nueves): cinco minutos de fallo al año como mucho. Los sistemas de fibra óptica funcionan normalmente a ese nivel de servicio. La FSO quizás encuentre una de sus principales aplicaciones en los sistemas de transmisión que conectan las estaciones base de radio celular con los centros de conmutación móvil conectados a la red telefónica pública conmutada; esta aplicación requiere una disponibilidad operativa intermedia, en torno al 99,99 por ciento.

Alcanzar un nivel de calidad funcional tan elevado es todo un reto para la óptica en el espacio libre. Cuanto mayor sea la densidad de la niebla, menor será la disponibilidad y más limitado el alcance admisible. En las regiones donde es muy rara la niebla intensa puede lograrse una disponibilidad excelente a una distancia muy cercana a la máxima alcanzable, alrededor de un kilómetro. Sin embargo, en climas menos favorables esta distancia sería mucho menor.

Para resolver el problema del alcance y la fiabilidad, cabe diseñar sistemas FSO con longitudes de enlace limitadas que forme parte de una topología de malla óptica interconectada, configuración semejante a una tela de araña que llevaría los servicios de banda ancha a numerosos edificios, demasiado alejados de la red básica de fibra óptica para poder conectarse a ella por medio de un solo enlace de FSO. En una red de transmisión de datos con esa estructura de malla, el edificio más cercano al término de la fibra óptica se equipa con un nodo FSO "raíz", el cual está unido a la fibra y contiene varios transceptores ópticos. Otros edificios atendidos se equipan también con nodos FSO provistos de transceptores múltiples. Estos transceptores permiten que los nodos se comuniquen con sus vecinos próximos utilizando la interconexión en malla.

Las señales destinadas a un edificio concreto se envían desde el nodo raíz a una determinada serie de enlaces de la malla, con nodos intermedios que actúan como repetidores regeneradores a lo largo del camino. Análogamente, un edificio envía señales al nodo raíz siguiendo otra ruta distinta. De este modo la longitud de cada enlace óptico es corta, tanto como para conseguir una gran inmunidad a la niebla. Si fallara un enlace, las señales se reencaminarían por una vía alternativa cualquiera de las redundantes que haya previstas, lo que facilita una recuperación rápida tras un fallo del equipo. Por último, la malla puede conectarse a varios nodos raíz, ofreciendo así una mayor capacidad total al grupo de edificios a los que se da servicio.

Cada estación regeneradora/repetidora de un sistema en malla debe



2. UNAS REDES de enlaces por láser invisibles podrían traer en breve plazo la revolución de la banda ancha.

CHIP SIMONS

El autor

ANTHONY ACAMPORA, doctor en ingeniería eléctrica por el Instituto Politécnico de Brooklyn, es profesor de la Universidad de California en San Diego, donde se dedica a técnicas de vanguardia en redes de telecomunicaciones. Es además primer científico y cofundador de AirFiber, compañía de San Diego que desarrolla técnicas de óptica en el espacio libre. Titular de 30 patentes, ha investigado en la Universidad de Columbia y en los Laboratorios Bell de AT&T.

contener, además de un pequeño número de transceptores ópticos, un conmutador electrónico que combine (por multiplexación) el tráfico de señales procedente del edificio local con el que llega desde otros edificios próximos y encamine las señales entre el nodo raíz y cada uno de los edificios atendidos. Por añadidura, las necesarias funciones de multiplexación, desmultiplexación y conmutación exigen que todas las señales procedentes de los diversos equipos informáticos y de comunicaciones de los usuarios se conviertan a un formato común. Realiza esta conversión de formatos un dispositivo llamado unidad de terminación de la red. Aunque los datos atraviesen multitud de nodos a lo largo de los diversos trayectos, los usuarios perciben cada señal como si se entregara a la red básica de fibra a través de una línea de transmisión exclusiva. De este modo es posible ofrecer a zonas extensas un ancho de banda propio de la fibra óptica e instalar con bastante rapidez y comodidad nuevos nodos, que incorpora más edificios a la red FSO.

Para cada señal procedente de cada edificio, los programas de gestión de la red eligen un trayecto a través de la malla que pase por uno de los nodos raíz del sistema. Como los programas detectan el fallo de un nodo, las señales afectadas pueden encauzarse instantáneamente de manera que sorteen el problema. Al diseñar la red se ha de prever en cada enlace óptico una reserva no asignada; así se garantiza que habrá capacidad suficiente para reencaminar el tráfico y recuperarse de los posibles fallos de uno o de múltiples enlaces.

El radioenlace punto a punto por microondas, técnica inmune a la atenuación de la niebla, compite con la óptica de espacio libre en despejar el atasco del último kilómetro. Presenta la desventaja de que se necesitan licencias para funcionar en la mayoría de las bandas de radiofrecuencias; en casi todas, además, está limitado el espectro disponible, con las consiguientes restricciones de capacidad. El radioenlace por microondas resulta además más costoso que los sistemas de FSO, y sus transmisiones son vulnerables a la interferencia. Otra desventaja más es la considerable atenuación que sufre la señal cuando llueve mucho, especialmente en las frecuencias más altas, donde se hallaría más espectro disponible.

Sin embargo, funcionando en la frecuencia de 60 gigahertz, el enlace de microondas podría complementar el sistema de óptica en espacio libre. La Comisión Federal de Comunicaciones de EE.UU. ha asignado una porción del espectro aún libre en la gama de 60 GHz a las aplicaciones de alta velocidad. Esta concesión significa que se puede ofrecer más capacidad y utilizar un método de modulación que no aproveche con gran eficacia el espectro —y por tanto que cueste menos—, como una sencilla modulación todo/nada, por ejemplo. Dado que la lluvia intensa y la espesa niebla no ocurren simultáneamente, hay la oportunidad de potenciar la fiabilidad de la red mediante la combinación de la radio en 60 GHz con la FSO. El sistema resultante de la unión de ambas técnicas sería muy fiable a distancias mucho mayores.

Aunque a la óptica en el espacio libre le queda algún trecho por recorrer antes de solucionar sus problemas pendientes, se trata de la mejor opción para salvar el fatídico kilómetro final y causar la tan esperada revolución de la banda ancha.

Bibliografía complementaria

UNINET: A HYBRID APPROACH FOR UNIVERSAL BROADBAND ACCESS USING SMALL RADIO CELLS INTERCONNECTED BY FREE-SPACE OPTICAL LINKS. A. Acampora, S. Krishnamurthy y S. H. Bloom en *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, n.º 6, págs. 973-988; agosto de 1998.

A BROADBAND WIRELESS ACCESS NETWORK BASED ON MESH-CONNECTED FREE-SPACE OPTICAL LINKS. Anthony Acampora y Srikanth V. Krishnamurthy en *IEEE Personal Communications* (hoy llamada *IEEE Wireless Communications*), vol. 6, n.º 5; octubre de 1999.

FREE-SPACE LASER COMMUNICATION TECHNOLOGIES. Número especial de *Proceedings of SPIE* (publicación anual).

Nariz de topo

La del topo de nariz estrellada es probablemente la más rápida y fantástica del mundo

Kenneth C. Catania



El físico John Archibald Wheeler sugirió en una ocasión: “De cualquier campo, busquen lo más raro y explórenlo”. Cuesta imaginar un animal más extraño que el topo de nariz estrellada, o topo estrellado. Tiene la nariz festoneada por 22 apéndices carnosos; cuando escruta su entorno, se mueven tan deprisa, que la vista los confunde en un solo borrón. Añádase a ello un par de patas anteriores grandes, con garras, y tendremos un misterio biológico irresistible.

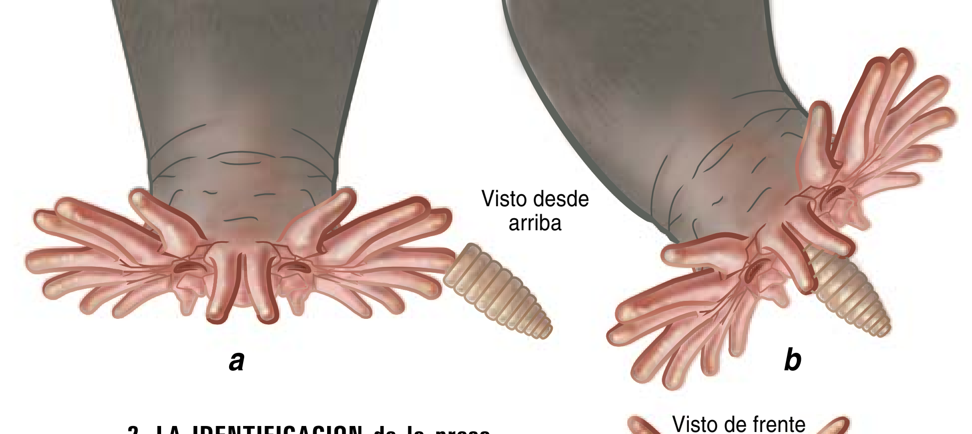
Quizás al lector le tranquilice saber que los topos estrellados *(Condylura cristata)* son pequeños; no pesan más de 50 gramos, el doble que un ratón. Viven en los túneles someros que excavan en los humedales de gran parte de las regiones nororiental de Estados Unidos y oriental de Canadá; cazan tanto bajo tierra como bajo el agua. Igual que los otros treinta y tantos miembros de la familia de los topos (Tálpidos), el de nariz estrellada forma parte del orden Insectívoros, grupo de mamíferos del que se conocen su elevado metabolismo y voraz apetito. Ha de localizar presas suficientes para sobrevivir a los fríos inviernos septentrionales. Busca lombrices de tierra en el suelo, como otros topos, y además toda una serie de pequeños invertebrados y larvas de insecto que pueblan el rico fango y hojarasca de sus hábitats en los humedales, estanques y arroyos, por cuyo turbio fondo nada para ir obteniendo presas. Y en la busca de presas es donde la estrella nasal interviene. No forma parte del sistema olfativo, ni es una mano suplementaria con la que maneje la comida. Es un órgano del tacto de sensibilidad inigualada.

La estrella vista de cerca

Cuando empecé a examinar la anatomía de la estrella con un microscopio electrónico de barrido (que revela la estructura microscópica de la superficie de la piel), pensaba que vería receptores del tacto aquí y allá, dispersos por la piel; me sorprendió encontrar que la estrella, como la retina del ojo humano, está constituida *enteramente* por órganos sensoriales. La superficie de cada uno de los 22 apéndices que rodean los orificios nasales está compuesta por una agregación de protuberancias microscópicas, o papilas, denominadas órganos de Eimer. A su vez, cada órgano de Eimer consta de un conjunto de estructuras neurales que señalan diferentes aspectos del tacto.

1. ESTA ESTRELLA ROSADA hace inconfundible la nariz del topo. La convierte en uno de los órganos táctiles más sensibles del reino animal; asombra la semejanza de su funcionamiento al de un ojo.

KENNETH C. CATANIA



Visto de frente

2. LA IDENTIFICACION de la presa por parte del topo de nariz estrellada se produce en menos de medio segundo. Cuando los apéndices más largos tocan un objeto interesante (*a*), la nariz se mueve para que los más cortos y sensibles lo palpen e identifiquen *(b)*; el topo lo devorará en el acto.

PORTIA SLOAN

Tres receptores sensoriales distintos acompañan a cada órgano de Eimer. En el mismo fondo, los órganos de Eimer llevan una sola terminación nerviosa, rodeada por muchos anillos concéntricos, o lamelas, de tejido formado por una célula de Schwann, un tipo especializado de célula de sostén. Este receptor lamelado transmite información, sencilla, sobre vibraciones o sobre el momento en que uno de los órganos contacta por primera vez con un objeto. Por encima de este receptor se encuentra otra fibra nerviosa, que establece contacto con una célula especializada, la célula de Merkel. A diferencia de la variedad lamelada, el complejo célula de Merkel-neurita señala únicamente la depresión continuada de la piel. Es común encontrar estos dos tipos de receptores en la piel de los mamíferos.

Pero sobre cada uno de los órganos de Eimer se encuentra un receptor que es característico de los topos. Una serie de terminaciones nerviosas dibuja un patrón circular de engrosamientos neurales, dispuestos como el cubo y los radios de una rueda, justo debajo de la superficie externa de la piel. Los registros que hemos tomado de cerebros de topos de nariz estrellada dan a entender que este último componente sensorial aporta el aspecto más significativo de la percepción táctil: un índice de la textura microscópica de las diferentes superficies.

Aunque la superficie de la estrella mide menos de un centímetro cuadrado, la componen más de 25.000 órganos de Eimer, inervados por más de 100.000 fibras nerviosas que transportan la información hasta el sistema nervioso central y, en última instancia, hasta el centro superior de procesamiento de los mamíferos, la neocorteza. Con este formidable conjunto de receptores, el topo efectúa discriminaciones sensoriales con increíble rapidez mientras ronda, ávido de presas.

La estrella se mueve tan deprisa, que no es posible verla a simple vista. Una cámara de gran velocidad descubre que toca 12 o más áreas por segundo. Gracias a estas exploraciones del entorno con rápidas series de palpamientos, un topo estrellado puede encontrar y comer cinco piezas distintas, por ejemplo los fragmentos de lombriz de tierra que le damos en el laboratorio, en un solo segundo.

El autor

KENNETH C. CATANIA se encontró por vez primera con los topos de nariz estrellada cuando trabajaba en el Zoo Nacional de Washington, hace muchos años. Es profesor de ciencias biológicas en la Universidad Vanderbilt y estudia el sistema sensorial de los mamíferos y la organización de la neocorteza. Se licenció en zoología por la Universidad de Maryland y doctoró en neurociencia por la de California en San Diego. Ha recibido el premio de Neuroetología de la Fundación Capranica y el premio de jóvenes investigadores de la Sociedad Internacional de Neuroetólogos; es asimismo becario Searle.

Funciona como un ojo

Más asombrosa incluso que esta velocidad es la manera en que el topo utiliza la estrella. Desempeña la función de un ojo. Intente el lector leer esta frase sin mover los suyos, y pronto se dará cuenta de que tiene el sistema visual dividido en dos sistemas funcionales distintos. En todo momento, el área central de la retina, la fóvea, de gran resolución, analiza sólo una pequeña porción de una escena visual (alrededor de un grado). El área de baja resolución de la retina, mucho mayor, localiza puntos que pudieran ser importantes, para que se los analice luego. Los característicos movimientos rápidos de los ojos, con los que resitúa la fóvea, se denominan movimientos sacádicos.

Del mismo modo que escudriñamos una escena visual con nuestros ojos, los topos de nariz estrellada desplazan constantemente su estrella mientras se desplazan por los túneles para escudriñar escenas táctiles. Exploran rápidamente grandes áreas con los órganos de Eimer de sus 22 apéndices, pero cuando se topan con una de interés (un posible alimento, digamos), mueven siempre la estrella de manera que un único par de apéndices realice exploraciones más detenidas. Los seres humanos poseen una fóvea para la vista; los topos de nariz estrellada, una para el tacto. La fóvea del topo está constituida por el par inferior de apéndices cortos, situado sobre la boca; a cada uno de ellos se los designa como apéndice undécimo. Al igual que la fóvea de la retina, esta parte de la estrella posee la mayor densidad de terminaciones de nervios sensoriales. Además, los rápidos movimientos de la estrella que resitúan esta fóvea táctil sobre los objetos de interés son análogos a las sacudidas del sistema visual.

La analogía va incluso más allá. En nuestro sistema visual no sólo

los movimientos de los ojos y la anatomía de la retina tienen su razón de ser en la fóvea de alta resolución; el cerebro humano se especializa sobre todo en el procesamiento de la información que viene de esa parte de la escena visual.

Un rasgo característico del procesamiento de la información en los sistemas sensoriales de los mamíferos es la organización topográfica de la información procedente de los receptores sensoriales. Las áreas visuales contienen mapas de la retina; las auditivas, de la cóclea (los receptores del oído, que son mapas de tonos); las del tacto, de la superficie del cuerpo. Quizá no exista mejor ilustración de esta cartografía sensorial que en el sistema somatosensorial del topo de nariz estrellada.

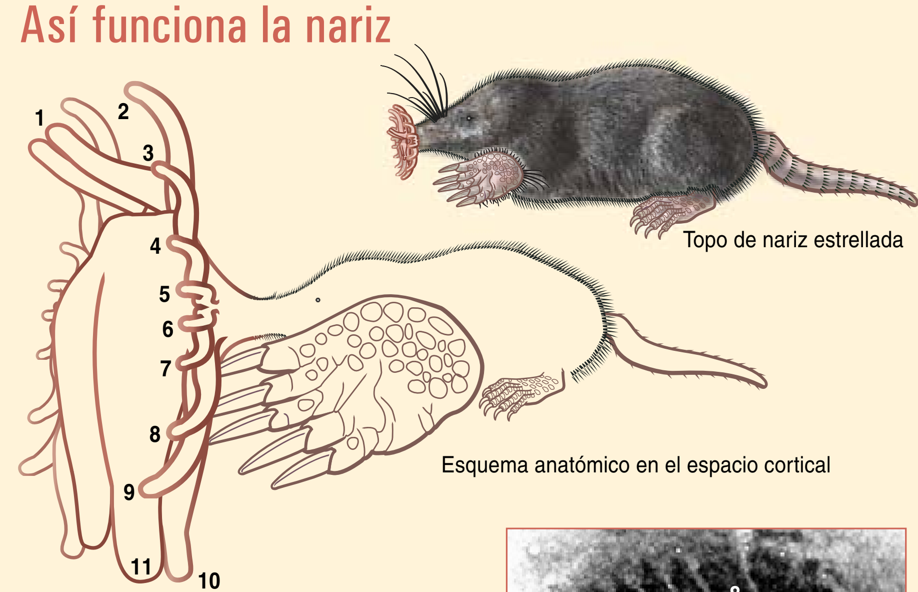
Cartografiar el tacto

Exploré con John H. Kaas, de la Universidad Vanderbilt, la organización de la neocorteza del topo estrellado. Mediante el registro de la actividad de las neuronas que componen distintas áreas corticales cartografiamos la representación neuronal de la estrella; mostramos dónde y cómo las neuronas de la corteza responden a la estimulación táctil de los órganos de Eimer. Identificamos tres mapas distintos de la estrella en los que las respuestas de las neuronas reflejan la anatomía de la nariz de la parte opuesta de la cara. (En todos los mamíferos, la parte izquierda del cuerpo está representada de forma predominante en el lado derecho de la corteza, y viceversa.) Para nuestro asombro, descubrimos asimismo que esos mapas eran visibles en secciones del cerebro teñidas con diversos marcadores celulares: en la corteza vimos, entiéndase al pie de la letra, una forma estrellada.

Cuando comparamos el tamaño de los mapas de la corteza cerebral con los apéndices de la estrella, advertimos una discrepancia evidente. El apéndice undécimo, una de las partes más pequeñas de la estrella, tenía, con mucha diferencia, la representación mayor en la corteza. Esta discrepancia es un clásico ejemplo de magnificación cortical: la parte más importante de

KENNETH C. CATANIA (*micrografías*); PORTIA SLOAN (*dibujos*)

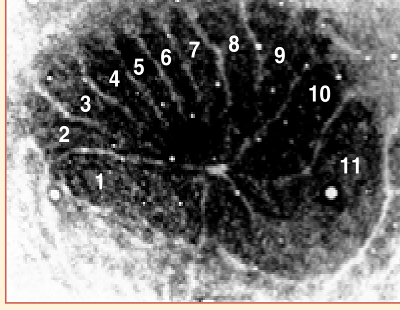
Así funciona la nariz



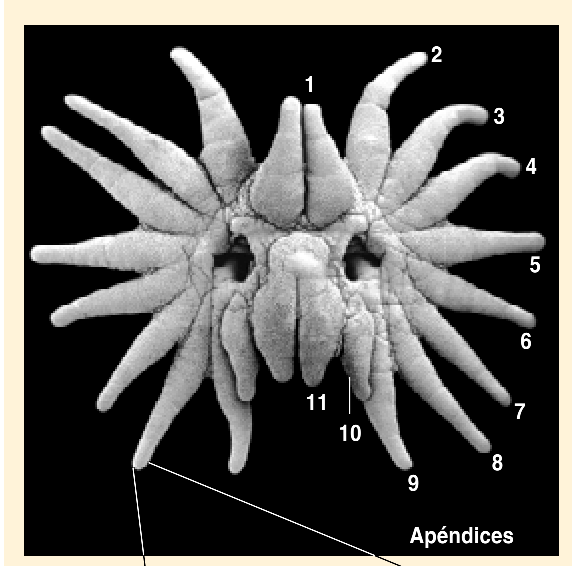
Topo de nariz estrellada

Esquema anatómico en el espacio cortical

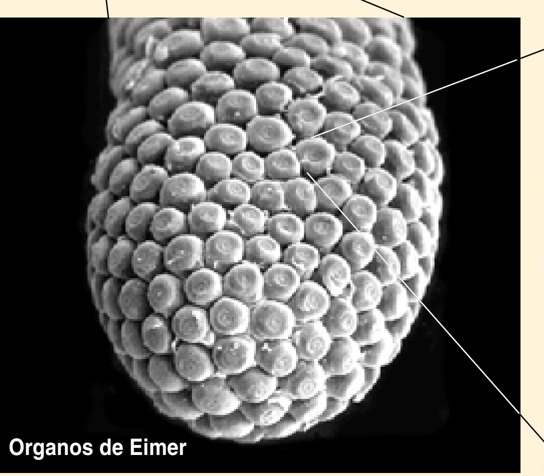
3. LOS MAPAS CORTICALES del topo estrellado revelan la importancia del undécimo apéndice. Tal como muestra este esquema, el apéndice más sensible tiene asignado mayor espacio en la corteza cerebral (*arriba*). Lo mismo ocurre con la parte más sensible del ojo humano. La organización de la corteza también refleja con claridad la posición de los apéndices (*derecha*) y su importancia relativa.



Corteza cerebral derecha



4. LOS APENDICES de la estrella están constituidos exclusivamente por los órganos de Eimer; de naturaleza sensorial, poseen elementos comunes con los receptores cutáneos de muchos animales: una terminación nerviosa en la base misma (*a*), que transmite información sobre las vibraciones y el contacto inicial con un objeto, y otra fibra nerviosa que registra la presión continua (*b*). Pero el extremo apical del órgano de Eimer sólo se encuentra en los topos; se trata de unos abultamientos neurales dispuestos bajo la piel externa, sensibles al relieve de las superficies (*c*).



c
b
a

la superficie sensorial adquiere la mayor representación en el cerebro, con independencia del tamaño real del área sensorial del animal.

Se observa el mismo fenómeno en el sistema visual, donde la fóvea retiniana, pequeña, ocupa, con una gran diferencia también, la mayor porción de los mapas corticales visuales. Descubrimos asimismo que las neuronas que representan el undécimo apéndice respondían a la estimulación táctil de áreas muy pequeñas, o campos receptivos, en dicho apéndice, mientras que las neuronas que representan los demás apéndices respondían sólo a la estimulación de áreas mayores. Que los campos receptivos del apéndice undécimo sean menores significa que esa región goza de una mayor agudeza y recuerda la organización de los sistemas visuales.

El descubrimiento de una fóvea somatosensorial en el topo de nariz estrellada sugiere que esta pauta de organización es una solución evolutiva general al problema de construir un sistema sensorial de alta resolución. Nos resultan conocidos sobre todo los sistemas visuales con fóvea, pero los auditivos pueden tener asimismo una fóvea acústica, como ha demostrado en los murciélagos bigotudos Nobuo Suga, de la Universidad de Washington. Muchos murciélagos emiten un grito de ecolocación, constituido por una estrecha gama de frecuencias, y después analizan los ecos que retornan; así navegan y detectan las presas. Una gran proporción de los receptores auditivos de los murciélagos (las células ciliares de la cóclea) y extensas zonas de su cerebro se dedican al análisis de una estrecha gama de frecuencias, correspondiente a un único armónico del eco de retorno. Es un ejemplo de fóvea acústica.

Aunque es difícil de imaginar, los murciélagos poseen una versión auditiva del movimiento sacádico. La necesitan porque la frecuencia de los ecos de retorno les llega cambiada a causa del efecto Doppler (en función de la velocidad del murciélago y de su objetivo, por lo general un malhadado insecto): a menudo cae fuera del intervalo de frecuencias de la fóvea acústica. El murciélago que caza no puede cambiar su fóvea acústica; cambia sin cesar la frecuencia de los impulsos que emite para que el eco de retorno, desplazado por el efecto Doppler, coincida con la frecuencia de la fóvea acústica. Esta "compensación del efecto Doppler" es el equivalente acústico de mover los ojos, o la estrella, para analizar un estímulo con el área de alta resolución de la superficie sensorial y las áreas computacionales correspondientes del cerebro.

La presencia de una fóvea sensorial en el sistema visual, el sistema auditivo y el sistema somatosensorial de los mamíferos es un caso impresionante de evolución convergente. Indica restricciones comunes en la manera en que la evolución puede construir un cerebro complejo. Al fin y al cabo, ¿por qué no se construye el sistema sensorial de manera que sólo registre señales de gran resolución, con lo que se eliminaría la necesidad de cambiar de forma constante la posición de los ojos, de la estrella o de la frecuencia de ecolocación? Una razón es que el cerebro y los nervios que conducen hasta él las señales sensoriales tendrían que expandirse muchísimo para llevar a cabo esa tarea.

Abruma el tamaño que habría de tener el cerebro humano para que la retina entera poseyese la misma resolución que la fóvea: al menos cincuenta veces mayor. Es más eficiente dedicar buena parte de los recursos de computación del cerebro a una porción restringida del sistema sensorial y mover después esa área, como si fuese un foco de teatro, a fin de analizar aspectos importantes del mundo.

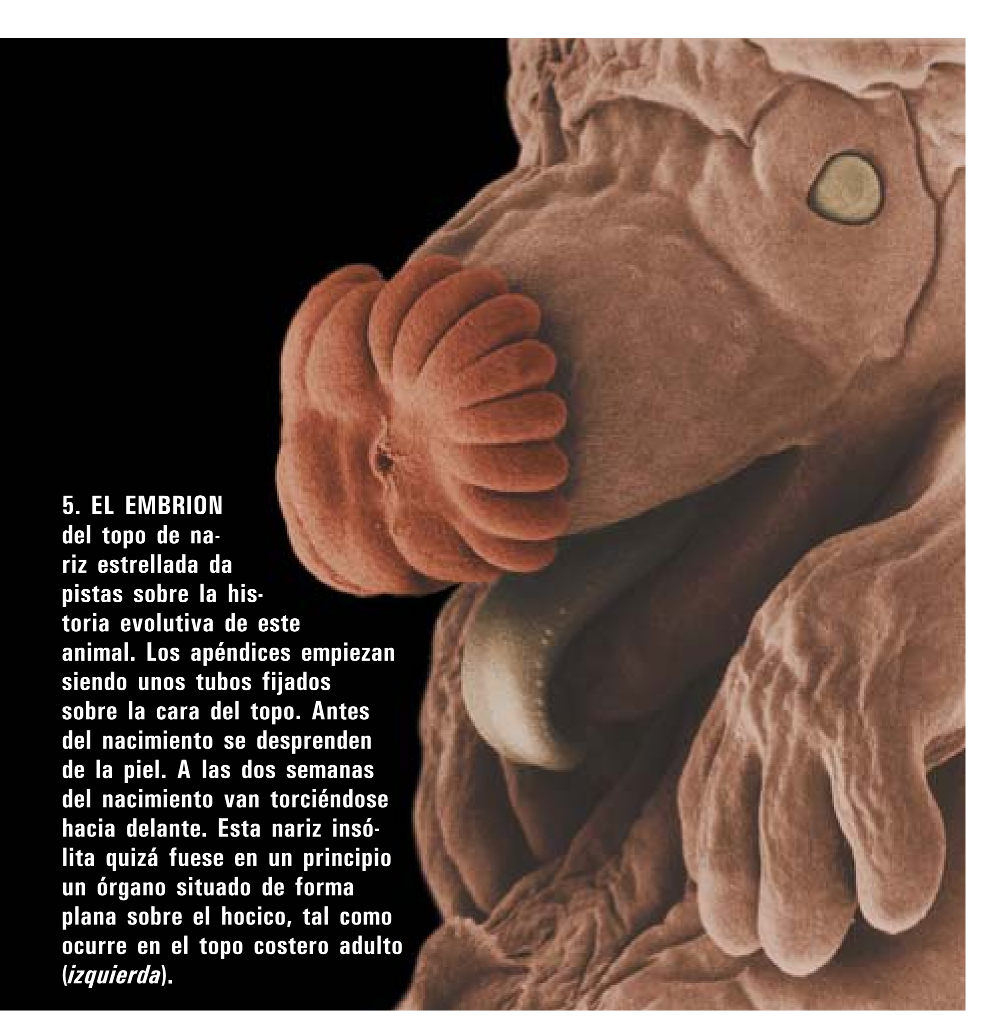
La lucha por el espacio en el cerebro

Como suele ocurrir, nuestras observaciones del sistema sensorial del topo de nariz estrellada plantearon nuevas cuestiones. ¿Cómo llega una parte de una superficie sensorial a atribuirse una sección tan extensa del mapa del cerebro? Según la interpretación tradicional, cada señal sensorial aferente recibe la misma cantidad promedio de superficie en el mapa cortical durante el desarrollo; la representación ampliada, pues, de una fóvea sensorial reflejaría sólo el mayor número de neuronas que recogen información de la región foveal. Este esquema teórico, basado en que todas las señales recibidas tienen el mismo derecho a ocupar espacio cerebral, atrae por su sencillez. Pero varios estudios han puesto no hace mucho en tela de juicio esta naturaleza democrática de la parcelación cortical en el sistema visual de los primates; han demostrado que a las señales procedentes de la fóvea se les destina más terreno cortical que a las que contienen información periférica.

Para ver lo que ocurría en el topo de nariz estrellada, decidimos medir las representaciones corticales de los 22 apéndices y comparar esas zonas con el número de fibras nerviosas que recogen información procedente de cada apéndice. Era evidente (¡después de contar más de 200.000 fibras nerviosas!) que a las neuronas sensoriales que recogen la información procedente del undécimo apéndice se les concede mucho más territorio cortical en los mapas cerebrales que a las procedentes de los demás apéndices de la estrella. Se advierte aquí otro paralelismo entre el sistema somatosensorial del topo y los sistemas visuales de los primates; demuestra no sólo que las áreas importantes de una superficie sensorial pueden tener, por unidad de superficie, un número mayor de neuronas sensoriales que recojan información, sino también que a cada una de estas señales de entrada se le puede con-



KENNETH C. CATANIA



5. EL EMBRION del topo de nariz estrellada da pistas sobre la historia evolutiva de este animal. Los apéndices empiezan siendo unos tubos fijados sobre la cara del topo. Antes del nacimiento se desprenden de la piel. A las dos semanas del nacimiento van torciéndose hacia delante. Esta nariz insólita quizá fuese en un principio un órgano situado de forma plana sobre el hocico, tal como ocurre en el topo costero adulto (*izquierda*).

ceder espacio computacional adicional en el cerebro.

Sin embargo, esta observación no explica de qué modo esas señales sensoriales aferentes toman la mayor parte del terreno en los mapas corticales. Esta pregunta corresponde a una de las áreas más fascinantes de la neurociencia; los cambios en los mapas corticales son quizás un componente fundamental del aprendizaje de habilidades complejas y de la recuperación cuando el cerebro ha sufrido una lesión o un accidente cerebrovascular. Varios estudios indican que una combinación de mecanismos intrínsecos de desarrollo y de una plasticidad ligada a la experiencia afecta a la configuración y al mantenimiento de los mapas cerebrales.

Estos hallazgos llaman la atención de manera especial en el caso del topo de nariz estrellada: las pautas que sigue al usar la nariz (medidas por la manera en que toca las presas con los distintos apéndices) concuerdan de manera muy exacta con el patrón que obedece la magnificación de las representaciones de los apéndices en la corteza. La correspondencia sugiere que el comportamiento modela la organización de la corteza. O bien, puede que los mecanismos de desarrollo intrínsecos casen el tamaño de los mapas corticales con su significado etológico. Se trata de un ejemplo más del dilema clásico entre naturaleza y crianza.

El desarrollo de la estrella

La observación del desarrollo de la estrella en los embriones de topo quizá contribuya a esclarecer este asunto. Puesto que la estrella se configura antes que su representación en la corteza, las señales sensoriales que proceden de ella tienen la oportunidad de influir en la constitución de los mapas corticales durante los períodos críticos del desarrollo.

Los embriones de los topos estrellados cuentan entre los más extraños que imaginarse pueda. La mayoría de los embriones presentan un aspecto raro, pero los de estos topos parecen aún más excéntricos: las manos son gigantescas (para que excaven luego mejor) y la nariz, única.

Estudios realizados en los embriones revelaron que el apéndice undécimo era el mayor en las primeras fases del desarrollo, a pesar de su menor tamaño en los adultos. También resultó claro que los órganos de Eimer estelares y las estructuras neurales dentro de cada órgano de Eimer maduraban primero en el apéndice undécimo. Es como si éste gozara de una ventaja de partida en comparación con los demás, que luego lo sobrepasan en tamaño y número de órganos de Eimer. La fóvea retiniana del sistema visual madura, a su vez, muy pronto.

Cuando examinamos los patrones correspondientes en la corteza somatosensorial, encontramos que los primeros marcadores de actividad metabólica que aparecen son los de la representación del apéndice undécimo. Da ello a entender que el desarrollo temprano de la fóvea comporta una mayor actividad en la representación cortical, que todavía está desarrollándose, de dicha área; podrían quizás así apoderarse las señales que genera de una mayor área en el mapa cortical. En el proceso de conformación del sistema visual de los primates, hay claros indicios de que las señales sensoriales con mayor nivel de actividad captan a lo largo del desarrollo las zonas más extensas de la corteza. Pero también es posible que el patrón de comportamiento que siguen los topos de nariz estrellada al principio de su vida (utilizar el apéndice undécimo para lactar) contribuya a una expansión de la fóvea, dependiente de la actividad, en los mapas corticales. Nos proponemos dilucidar cuál sea la contribución relativa de estas distintas influencias.

Así consiguió el topo su estrella

¿De qué manera evolucionó el topo de nariz estrellada? El examen de los embriones proporcionó un plano de su evolución, o

al menos de la evolución de la enigmática nariz. El desarrollo de los apéndices que componen la estrella difiere del seguido por cualquier otro apéndice animal conocido. En lugar de crecer directamente a partir de la pared del cuerpo, se forman una suerte de cilindros, dirigidos hacia atrás y engastados en los lados de la cara del topo. A lo largo del desarrollo esos cilindros se separan poco a poco de la cara, se desprenden de la piel y, a las dos semanas del nacimiento, se doblan hacia delante y forman la estrella adulta. De la secuencia de desarrollo invertida se colige que los topos de nariz estrellada ancestrales pudieran presentar bandas de órganos sensoriales dispuestas en forma plana a los lados del hocico. A lo largo de muchas generaciones, debieron de erguirse lentamente hasta configurar la estrella.

Sin pruebas adicionales, es ésta una explicación que debe tomarse con suma cautela. Pero existen dos especies, el topo costero (*Scapanus orarius*) y el topo de Townsend (*S. townsendii*), que poseen cortas bandas planas de órganos sensoriales sobre la parte superior de la nariz; el parecido de la nariz de los adultos y de la estrella embrionaria resulta portentoso. Tales formas intermedias sugieren claramente que un antepasado de este tipo dio origen a la estrella completa que vemos hoy en día. Se creara como se creara, esta singular nariz puede enseñar mucho sobre la influencia de los mecanismos innatos de desarrollo y de los patrones de comportamiento en la organización de la corteza cerebral.

Bibliografía complementaria

THE NATURAL HISTORY OF MOLES. Martyn L. Gorman y R. David Stone. Cornell University Press, 1990.

SENSORY EXOTICA: A WORLD BEYOND HUMAN EXPERIENCE. Howard C. Hughes. MIT Press, 1999.

A NOSE THAT LOOKS LIKE A HAND AND ACTS LIKE AN EYE: THE UNUSUAL MECHANOSENSORY SYSTEM OF THE STAR-NOSED MOLE. K. C. Catania en *Journal of Comparative Physiology*, vol. 185, págs. 367-372, 1999.

John Adam

MARCIA K. MCNUTT: Navegando por mares ignotos con fondos privados

Moss Landing (California). "Vamos, pero tenga cuidado, que la marea está baja." Saltamos a bordo de la barcaza *Point Lobos*, y Marcia Kemper McNutt —un prodigio de eficiencia en tierra— se relaja a ojos vista. Este viejo cascarón con el porte de un remolcador, que prestó servicios de embarcación de enlace con las plataformas petrolíferas, surca ahora, remozado, la ensenada de Monterrey en pro de la ciencia. Llama a voces al piloto de un vehículo guiado por control remoto: "¡Eh, Knute! ¿Qué tal te va hoy?". Parece conocer no sólo el nombre de pila sino el estado de ánimo de cada ingeniero, científico o técnico que trabaja a sus órdenes, unos 200 en total.

McNutt sorprendió a más de uno cuando hace escasos años abandonó una cátedra prometedora en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Iba a ocupar muy pronto la jefatura del departamento y desempeñaba un cargo clave en la Institución Woods Hole de Oceanografía, buque insignia de la investigación marina. Pero lo dejó todo para dirigir el Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey (conocido por las siglas MBARI). Era éste, en comparación, un páramo intelectual, sin historia, que la gente confunde con el acuario turístico del mismo nombre emplazado 30 kilómetros más al sur.

No opinaba así entonces McNutt, para quien mejorar la labor del director de departamento del MIT sería imposible. Además, el MBARI parecía "destinado a ejercer una gran influencia", dice. Todo lo que necesitaba era un pequeño empujón. Ahora, como presidenta del MBARI, resulta que esta mujer de 50 años es de los científicos marinos con mayor peso en todo el mundo.



EDWARD CALDWELL

Para McNutt, escoger una opción excéntrica no es nada nuevo. Se matriculó en el Colegio Universitario de Colorado cuando su brillante expediente le hubiera abierto las puertas de una universidad de relumbrón. Su tutor le desaconsejó estudiar física, considerándola una carrera poco apropiada para mujeres. ¿Y qué hizo? Cambiar de tutor. Obtuvo la licenciatura en física con las máximas calificaciones.

En aquel entonces, a principios de los setenta, leyó el artículo de John F. Dewey sobre la tectónica de placas en *Scientific American*. "Tan elegante y tan simple, la teoría sólo podía ser cierta", rememora que pensó. Completó sus estudios con un doctorado en geología en la Institución Scripps de Oceanografía en La Jolla (California). Comenzó a salir al mar para investigar la cordillera mesooceánica, donde lindan las placas y se forma nueva corteza oceánica.

En los buques oceanográficos no sobra sitio, de modo que los estudiantes necesitaban acreditar alguna destreza que justificara su presencia. Se postuló para las labores de limpieza. Pasó un verano con los comandos SEAL de la marina estadounidense, aprendiendo el manejo de explosivos, su empaquetamiento en cordones detonadores y sincronización precisa de las cargas para que, con su estallido limpio, pudiera levantar la cartografía acústica del suelo oceánico. En una de esas misiones conoció a su marido, un capitán. Tienen tres hijas. McNutt se las arregla para continuar su investigación geofísica. Pero pasa la mayor parte del tiempo

en mantener el MBARI en orden de revista.

El instituto es producto de la imaginación de David Packard. El millonario ingeniero, fundador de Hewlett-Packard, tomó un vivo interés por los océanos en los últimos años de su vida, en parte gracias a sus hijas, que estudiaron ciencias del mar. Packard fundó el MBARI en 1987 como un complemento privado a la investigación de los océanos, dominada por el sector estatal. Creía que si los ingenieros trabajaban codo con codo con científicos de alto nivel se podrían abrir las profundidades del océano a la investigación.

La Fundación David y Lucile Packard dona cada año unos 40 millones de dólares al MBARI. Sus investigadores, libres de docencia y de todo el papeleo necesario para solicitar fondos de investigación del estado, proceden con agilidad, siempre que a McNutt le plazcan las propuestas. También pueden llevar a cabo proyectos arriesgados a largo plazo, empleando grandes medios técnicos, que en otro sitio serían rechazados en el proceso de evaluación. Un ejemplo: 12 años tomando mediciones en la bahía de Monterrey para ver si se da el calentamiento global, que acabaron por rendir fruto —explica McNutt— "cuando se observó una tendencia en los datos" que mostraba que un aumento relativamente pequeño de la temperatura resultaba en una mengua notabilísima de la productividad de biomasa algal.

A diferencia de otros institutos, el MBARI programa de manera autónoma el calendario de su creciente flota de navíos. (Los centros oficiales, atados a los fondos estatales, programan conjuntamente sus flotas para todos los científicos marinos de la nación.) Esa autonomía le proporciona al puesto de McNutt una gran influencia. Poco después de que Packard muriera, en 1996, McNutt asumió la dirección.

McNutt llegó justo cuando los nuevos edificios del MBARI, sus dos buques de investigación, sus dos vehículos guiados por control remoto (ROV) y sus sistemas para adquirir y catalogar la información entraron en servicio, o casi. "Subestimamos el tiempo que nos llevaría construir un nuevo instituto", confiesa Julie Packard, que sustituyó a su padre en el comité del MBARI. Sólo ahora, dice, con todo el equipamiento operativo, se empieza a recoger la renta científica, como se ve en el aumento de autores afiliados al MBARI que publican en revistas de prestigio.

Concédese a McNutt el mérito de templar las relaciones y de obtener lo mejor de su heterogéneo personal. Uno de sus primeros actos consistió en realojar algunos ingenieros en los codiciados despachos con vistas al mar que habían sido dominio exclusivo de científicos. (Su propio despacho rezuma austeridad.) Metafóricamente, los ingenieros del MBARI arrastran a los científicos a mayores abismos todavía. El primer ROV del instituto, una máquina readaptada de la industria petrolera, se sumergió hasta profundidades de casi dos kilómetros. El segundo incorporaba más modificaciones de la casa y alcanzó cuatro kilómetros. McNutt me muestra orgullosamente el vehículo submarino autónomo del MBARI, el *Zephyr*.



El orgullo del MBARI: McNutt con un sumergible y con una boya de adquisición de datos (página precedente)

EDWARD CALDWELL

En gran medida, los principales fenómenos del océano se sustraen a la observación. "Brota el plancton. Los volcanes entran en erupción. Las placas tectónicas se deslizan y desencadenan terremotos. Medran los peces. Las probabilidades de encontrarse en el lugar adecuado en el momento oportuno para examinar esos sucesos en acción son muy pequeñas", expone. Con el tiempo, el remedio lo podrían poner partidas de robots que naveguen. En suma, es un empeño para ver si con esas herramientas se pueden tratar cuestiones tan cruciales sobre el océano como el calentamiento global, la producción de energía y la continuidad de la actividad pesquera en los caladeros.

Frente a todos los intereses encontrados que pugnan por explotar o preservar el océano, McNutt mantiene una mentalidad abierta. Cuando presidió el Comité Presidencial para la Exploración de los Océanos, se aseguró primero de echar lastre. "No queríamos que hubiera gente sentada a la mesa, ocupando sitio y haciéndonos perder el tiempo, que no estuviera en condiciones de ofrecer fundamentos científicos de primera clase", recuerda. El grupo de eminentes científicos y educadores alcanzó un consenso pidiendo un proyecto de 10 años, que costará 750 millones de dólares, para realizar un inventario y explorar la Zona Económica Exclusiva (las 200 millas náuticas que se extienden desde las costas estadounidenses), los márgenes continentales, el Artico y otras regiones.

Dado que más o menos el 95 por ciento del océano nos es desconocido y está sin explorar, se diría que McNutt tiene mucho trabajo por delante. Pretende añadir otras 60 plazas permanentes y traer un grupo más amplio de científicos visitantes y de estudiantes en prácticas para mantener al MBARI conectado con una comunidad científica más amplia, y si es posible, un paso o dos por delante.

CIENCIA Y SOCIEDAD

Cambio climático

Ultima deglaciación

Para entender el clima del Cuaternario, que abarca los últimos dos millones de años, debemos determinar antes las causas y consecuencias de los ciclos glaciales. Resulta imprescindible su dominio si queremos entender el funcionamiento global del clima y utilizar este conocimiento para predecir futuras situaciones de cambio climático.

A lo largo de los últimos 20 años se ha venido estableciendo con claridad creciente la ocurrencia casi cíclica de cambios climáticos de gran magnitud a escalas de tiempo de milenios. Se sabe que las transiciones entre extremos climáticos se han desarrollado de manera abrupta, en marcos temporales de decenios. Algunos de los mecanismos postulados para dar cuenta de estas fluctuaciones son cambios en la producción de aguas profundas en el océano Atlántico norte y en las inmediaciones de la Antártida, cambios en el océano Pacífico tropical, en el contenido de gases invernadero en la atmósfera (H_2O, CO_2, CH_4), inestabilidad de los casquetes de hielo en el hemisferio norte y en la Antártida, y variabilidad solar.

En su mayoría, los registros paleoclimáticos que muestran esta variabilidad ha concernido, principalmente, al hemisferio norte y la Antártida, aunque no se ha demostrado la globalidad de estos eventos. Para lograr un entendimiento más acabado de las causas y consecuencias de cambios climáticos globales en el pasado es necesario determinar su extensión geográfica, en particular en las regiones donde los controles climáticos se muestran más taxativos.

Para someter a prueba las hipótesis de cambio climático global, necesitamos conocer las cronologías, tasas, amplitudes y direcciones de los cambios climáticos operados en las latitudes medias del hemisferio sur. A diferencia de las latitudes medias y altas del hemisferio norte, la investigación paleoclimatológica en el hemisferio sur permanece todavía en un estado incipiente de desarrollo. Queda por establecer si los cambios climáticos abruptos y de gran magnitud registrados durante la última glaciación y el presente interglacial fueron globales, dónde se originaron y que mecanismos estuvieron involucrados en su origen y propagación.



Yacimiento palinológico del Canal de la Puntilla (~41ºS) en el valle longitudinal de la Región de los Lagos chilena. Este pantano contiene un registro continuo de cambios en la vegetación y climáticos entre los 9500-20.200 ka. Al fondo se aprecia el volcán Osorno

Asimismo, las comparaciones entre los registros paleoclimáticos de las latitudes medias del hemisferio sur y los estudios realizados en la Antártida y el sector subantártico del océano Atlántico permitirán desentrañar las dinámicas de cambio climático hemisférico y la contribución de procesos climáticos tropicales y polares a los patrones de cambio climático regional.

Gracias a la abundancia y disponibilidad de registros sedimentarios de la última glaciación, la Región de los Lagos del sur de Chile (40º-42º S) constituye una zona ideal para abordar la estructura y cronología de cambios climáticos durante la última edad de hielo y en adelante.

Se trata de una de las regiones más exhaustivamente investigadas en Sudamérica desde las perspectivas de geología glacial y palinología. Nuestro grupo, integrado por expertos de varias universidades norteamericanas y europeas, se ha centrado en el desarrollo de registros geológicos, geomorfológicos y paleopalinológicos en la Región de los Lagos chilena y la Isla Sur de Nueva Zelanda.

Los registros de polen fósil pueden considerarse "parcelas de muestreo permanente" de la lluvia polínica durante miles o decenas de miles de años. Los cambios en los conjuntos polínicos reflejan cambios pasados de la vegetación, atribuibles a diversos factores ambientales (clima, sustratos, perturbación y otros).

Hemos puesto particular empeño en desarrollar registros paleoclimáticos de alta resolución espacial y temporal, controlados por una cronología radiocarbónica de fina precisión, con la idea de generar datos lo más detallados posible para comprender la evolución de la vegetación y clima durante la última glaciación y para poner a prueba las hipótesis de cambio climático global.

Nuestros datos muestran el predominio de comunidades de bos-

que lluvioso norpatagónico, actualmente distribuidas en los sectores medios y altos de las cordilleras de la Región de los Lagos, entre 13-10 ka. (Un ka son mil años radiocarbónicos antes del presente.) Es posible distinguir una etapa inicial, entre 13-12,2 ka, con especies norpatagónicas relativamente termófilas y ausencia de coníferas. A continuación, ocurre la expansión de árboles resistentes a condiciones más frías, como el coigüe (*Nothofagus*) y la conífera mañío macho (*Podocarpus nubigena*), a los 12,2 ka. Esta tendencia se ve acentuada a partir de 11,4 ka, para dar paso a especies arbóreas termófilas a los 10 ka, lo que señala el inicio del presente interglacial.

Algunos lugares muestran la rápida expansión de árboles favorecidos por perturbación por fuego entre 10,9-9,8 ka. Curiosamente, los registros más cercanos al yacimiento arqueológico de Monte Verde (41º 30′S, 72º 15′W) (el más antiguo de las Américas) fueron los más severamente afectados por fuego. Los estudios realizados en Monte Verde han demostrado la utilización humana de fuego entre 12,5-12 ka, lo cual podría dar cuenta de la perturbación ambiental a pequeña escala geográfica evidenciada en nuestros registros.

Nuestros resultados de la Región de los Lagos chilena (~41°S) dan fe de una simetría (en cuanto a cronología y dirección) de cambios climáticos con el hemisferio norte durante la última desglaciación. De ello se desprende que estas señales de cambio fueron globales y se propagaron a través de la atmósfera. Estos hallazgos no apoyan el mecanismo de acoplamiento interhemisférico denominado "balancín bipolar", el cual postula que, debido a variaciones en la formación de aguas profundas en el Noratlántico, la dirección de cambio climático en los hemisferios norte y sur debería ocurrir en antifase; en otras palabras, cuando un hemisferio se está calentando el otro se enfría, y viceversa.

De nuestras conclusiones se apartan los estudios palinológicos en los canales del sur de Chile (>45ºS), en el océano Atlántico Sur, y en la Antártida, que revelan un patrón de cambio climático distinto u opuesto al que identificamos en nuestra área de estudio. Estas diferencias regionales podrían indicar el papel decisivo de otros mecanismos climáticos; posiblemente, el balancín bipolar al sur de la convergencia la Antártida.

Si bien estas discrepancias podrían sugerir contradicciones, hay que considerar la posibilidad de que las latitudes medias y altas del hemisferio sur se vieran afectadas por diferentes controles climáticos y que, por lo tanto, muestren distintos patrones de cambio. Hasta ahora nadie tiene la última palabra y la pregunta sigue abierta.

Los registros paleoclimáticos de alta resolución y precisión temporal en las latitudes medias del hemisferio sur están empezando ya a dar sus frutos. Es de esperar que contribuyan de manera significativa al entendimiento de las causas y consecuencias de los cambios climáticos globales.

PATRICIO I. MORENO M.
Departamento de Biología,
Universidad de Chile

Salida de mitosis

Inactivación de CDK y replicación del genoma

La información genética contenida en el genoma de una célula se transmite fielmente a la célula hija gracias a la precisa duplicación de sus cromosomas, previa a la división celular. Los procesos de síntesis de ADN (fase S) y de mitosis (fase M) se hallan perfectamente coordinados en cada ciclo de división celular. El ciclo celular se completa con una fase G1, en la que la célula prepara la maquinaria necesaria para la síntesis de ADN, y una fase G2, que precede a la división nuclear y citoquinesis; en esta última se corrigen posibles errores replicativos. Los procesos celulares característicos de las distintas fases del ciclo, así como las proteínas que los llevan a cabo, persisten (están conservados) en todas las células eucariotas.

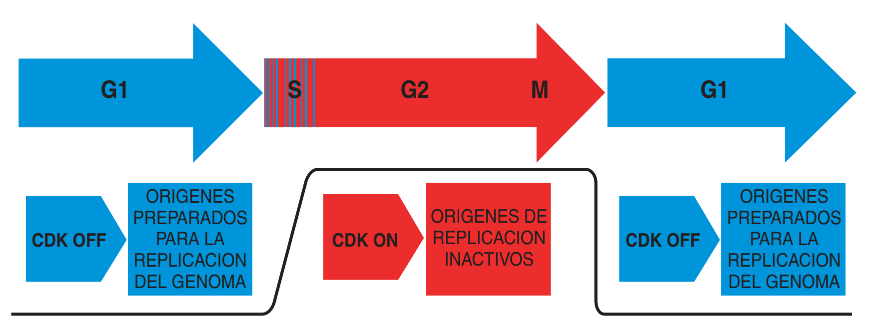
La correcta progresión por las distintas fases del ciclo celular viene regulada por una quinasa dependiente de ciclina, o CDK, complejo enzimático que consta de una subunidad catalítica y una subunidad activadora denominada ciclina. Los complejos CDK aparecen en todos los organismos eucariotas hasta ahora estudiados, si bien el número de sus componentes puede diferir de uno a otro. Así, las levaduras *Saccharomyces cerevisiae* y *Schizosaccharomyces pombe* producen una única subunidad catalítica, Cdc28 y Cdc2 respectivamente, activada por diversas ciclinas específicas de cada fase del ciclo. En el caso de células de mamíferos existe una familia de proteínas Cdk relacionadas (Cdk1, 2, 4 y 6) que se asocian, a su vez, con múltiples ciclinas y cuyas combinaciones dan lugar a complejos CDK peculiares de cada fase del ciclo celular.

La actividad quinasa de los complejos CDK oscila a lo largo del ciclo celular y promueve la fosforilación de sustratos específicos; en virtud de ello, activan o desactivan efectores que, a su vez, inducen o inhiben la transición por las distintas fases del ciclo.

Durante la fase G1 los niveles de actividad CDK se mantienen muy bajos, condición que facilita el ensamblaje de los complejos prerreplicativos a los orígenes de replicación del ADN, capacitando a la cromatina para acometer su duplicación. El disparo de la síntesis de ADN a partir de estos orígenes de replicación requiere, sin embargo, de la actividad CDK, cuyos niveles aumentan y marcan el comienzo de la fase S.

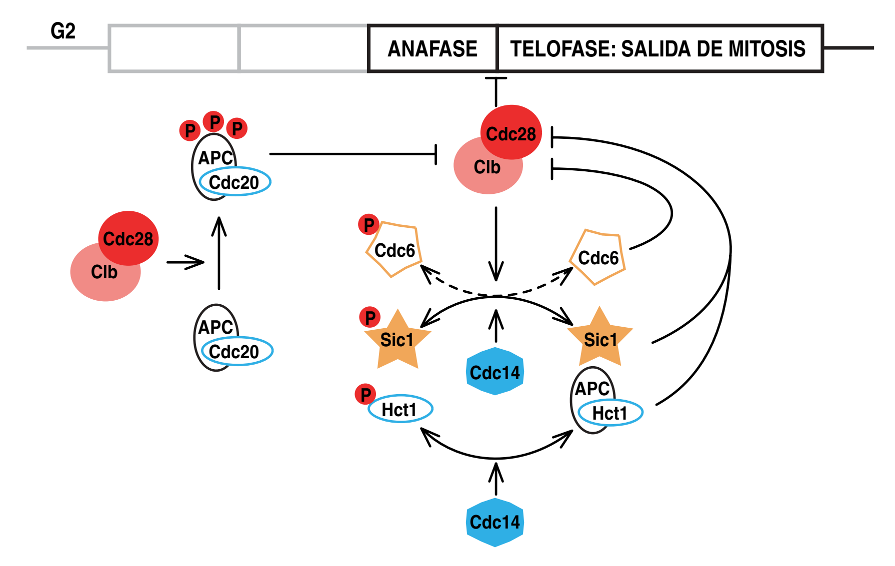
Durante las fases S, G2 y M los niveles de actividad CDK inhiben la formación de nuevos complejos prerreplicativos, garantizando una sola ronda de replicación por cada ciclo de división celular. De esta forma, la alternancia entre la replicación del genoma y la mitosis está asegurada por los ciclos de activación/inactivación de los complejos CDK (*véase la figura 1*).

Los procesos que la célula realiza para salir de mitosis (disgregación del huso mitótico, descondensación de los cromosomas, citoquinesis y otros) dependen de



1. La periodicidad de la actividad CDK limita la replicación del genoma a una sola vez por ciclo de división celular. La línea negra representa los niveles relativos de actividad quinasa asociada a CDK

una caída drástica de los niveles de actividad CDK. La inactivación de los complejos CDK a la salida de mitosis constituye un paso común en las células eucariotas. En la levadura *S. cerevisiae* esto se consigue mediante dos mecanismos que funcionan en paralelo: la degradación de las ciclinas mitóticas vía proteasoma a través del complejo promotor de la anafase (APC) o ciclosoma (C) y la inhibición directa de la actividad quinasa de los complejos CDK por el inhibidor Sic1. Las proteínas Cdc20 y Cdc14 intervienen entonces para llevar a cabo estos procesos. Así, mientras ambas proteínas activan el complejo APC/C, con la consiguiente degradación de las ciclinas, la fosfatasa Cdc14 también es responsable de la estabilización del inhibidor de CDK Sic1. Tras la intervención de Cdc14, los niveles de actividad CDK caen drásticamente y la salida de mitosis o entrada en G1 es un paso irreversible (*véase la figura 2*).



2. Modelo de inactivación de los complejos CDK a la salida de mitosis en S. cerevisiae. *Este proceso inactivador posibilita la replicación del genoma en el siguiente ciclo celular. La acción consecutiva de las proteínas Cdc20 y Cdc14 alcanza dicho objetivo. El complejo APC/C, responsable de la degradación de las ciclinas, es activado en primer lugar por Cdc20 y, posteriormente, por la proteína Hct1/Cdh1, activada ya por Cdc14. La fosfatasa Cdc14 promueve, además, un proceso paralelo de inhibición de la actividad CDK mediado por Sic1. Al menos uno de los componentes de la maquinaria de replicación, la proteína Cdc6, interviene en este proceso de bloqueo. En el modelo, las flechas indican un proceso de activación; las barras, uno de inhibición. En línea discontinua se presenta un paso especulativo. El complejo CDK está representado por Cdc28 y Clb.*

El homólogo de Cdc14 en *S. pombe* parece desempeñar también una función importante en la inactivación de los complejos CDK a la salida de mitosis, aunque por diferentes mecanismos de los utilizados por *S. cerevisiae*. Puede, pues, aceptarse que, en las levaduras, esta proteína desempeña un papel indirecto en el inicio de la fase S a través de su implicación en la inactivación de los complejos CDK mitóticos: en tanto en cuanto Cdc14 no inactive a estas quinasas, los complejos prerreplicativos que hacen competente al genoma para su duplicación no se formarán en los orígenes de replicación, ni se producirá la síntesis de ADN. En el caso de las células de mamíferos se desconoce el papel que los homólogos de Cdc14 (CDC14A y CDC14B) puedan desempeñar en este punto del ciclo.

Nuestro grupo ha puesto de manifiesto una conexión adicional, directa, entre mitosis y replicación del ADN. La proteína Cdc6 es esencial para el inicio de la replicación del ADN por constituir un factor crítico en la formación de los complejos prerreplicativos en la fase G1 del ciclo celular. De nuestra investigación se desprende que este factor podría participar en la salida de mitosis cooperando con Sic1 y Hct1/Cdh1 en la inactivación de los complejos CDK; posibilitaría así las condiciones necesarias para realizar su función en G1 como proteína iniciadora de la replicación.

La integridad e identidad celulares precisan de una perfecta coordinación entre los distintos procesos llevados a cabo en cada fase de su ciclo biológico. Esa conjunción se consigue gracias a la adecuada participación de numerosas proteínas celulares. Identificar estas proteínas y conocer la función o funciones asignadas a cada una ayudará a entender el mecanismo en virtud del cual se regulan y armonizan las distintas etapas del ciclo de división celular, mientras la célula mantiene su orden interno.

MARÍA SACRISTÁN
y AVELINO BUENO
Centro de Investigación
del Cáncer
Universidad de Salamanca

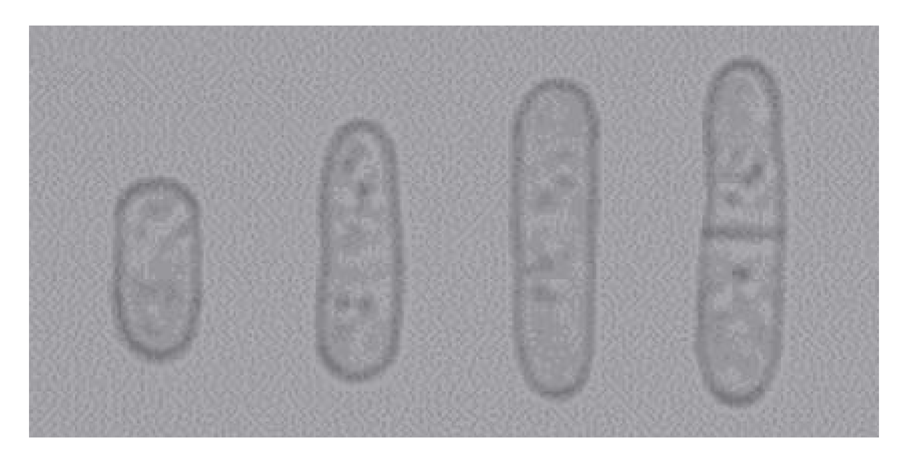
Genómica

Secuenciación de la levadura de fisión

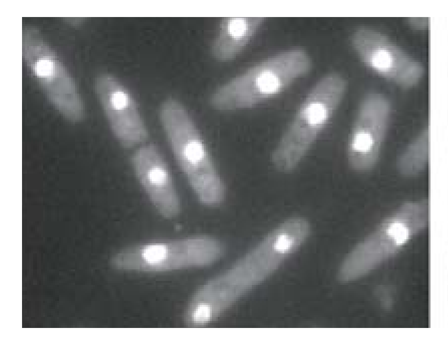
En biología hemos aprendido a leer la secuencia de nucleótidos del ADN de forma automatizada hace apenas 15 años. La secuenciación de genes ha permitido acceder de forma directa a la información que contienen. No obstante, leer genes es algo parecido a leer frases de un libro, y como en este caso, las frases sueltas dan poca información sobre el contenido. Leer libros completos, en términos biológicos, corresponde a leer genomas de distintos organismos. Son varios los "libros" ya leídos, entre los que destaca el propio "genoma humano", además de otros "títulos genómicos" que tienen una importancia básica en ciencia, entre otras cosas, porque son necesarios incluso para entender el propio genoma humano.

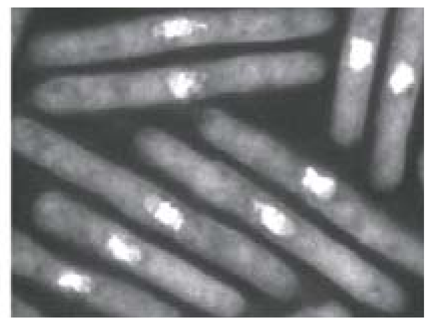
A pesar de saber ya leer con fluidez, de ninguna forma cabe pensar que haber aprendido a decir en voz alta las letras de las palabras génicas de cada organismo es el final del proceso. Estamos en el principio de saber interpretar y comprender lo que leemos. Un procedimiento esencial para distinguir secuencias importantes es descubrir aquellas que son comunes en genomas de organismos distintos: la genómica comparada constituye, pues, una de las piezas angulares para revelar genes y otros elementos funcionales de especial significado.

Cuanto más separados estén en la escala evolutiva los organismos que se comparan, tanto más básica será la función de los genes comunes. En este sentido, la secuencia de organismos como las levaduras aportan una valiosa información para distinguir genes eucarióticos especialmente conservados en toda la escala evolutiva. En febrero del año en curso, la revista *Nature* publicó la secuencia completa del genoma de *Schizosaccharomyces pombe*. En la secuenciación de esta levadura se ha invertido más de cinco años. Participaron varios grupos europeos, incluido el nuestro de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla. Un trabajo de estas características implica la generación de millones de secuencias parciales ligeramente solapadas y el montaje bioinformático de todas ellas para crear un mapa génico de las casi 15 megabases que tiene el genoma de *S. pombe*.



1. Microfotografía de células de S. pombe *en distintos estadios del ciclo de división. La duración del mismo es de aproximadamente 2 horas, lo que facilita su cultivo y análisis genético*





2. Tinción de núcleos en células silvestres (izquierda) *y mutantes en un gen esencial del ciclo celular* (derecha). *La facilidad para identificar mutantes de ciclo hacen de esta levadura un modelo especialmente útil para entender el cáncer*

Esta levadura, que se aisló originalmente de una cerveza africana de mijo, ha resultado un magnífico organismo modelo en el que estudiar el proceso por el que las células se dividen y multiplican. Esta aportación ha sido recientemente reconocida con la concesión del premio Nobel a Paul Nurse, pionero en el uso de *S. pombe* como modelo para entender la proliferación celular. Desde el punto de vista evolutivo, se halla muy distante de la levadura panadera (*S. cerevisiae*), cuya secuencia genómica se conoce también. La divergencia entre ambas es de la misma magnitud que entre *S. pombe* y las células humanas; por consiguiente, las funciones que se encuentren conservadas entre ambas levaduras posiblemente también lo estén en humanos. Esto da al genoma de *S. pomb*e un importante papel de "piedra Rosetta", en el sentido de que el análisis comparativo entre estos genomas más simples facilita la interpretación de genomas más complejos.

El análisis preliminar de la secuencia ha determinado que aproximadamente el 60 % del genoma de *S. pombe* codifica para proteínas; con una densidad génica de 1 gen por cada 2500 bases hasta un total de 4940 genes distribuidos en tres cromosomas. Sólo 24 de estos genes son duplicaciones exactas y se encuentran en regiones teloméricas (extremos de cada cromosoma). El éxito que tiene esta levadura como modelo biológico reside en la facilidad de extrapolar estudios sobre ciertos genes humanos para el entendimiento de los defectos que provocan una enfermedad. Si uno

compara este genoma con un grupo de 289 genes humanos que están alterados en enfermedades genéticas humanas se da cuenta de que 172 tienen similitud con genes de *pombe* y, de éstos, 50 son casi idénticos (23 implicados en cáncer, 12 en enfermedades metabólicas, 13 en enfermedades neurológicas, 1 en enfermedad cardiaca y 1 más en enfermedad renal).

Como se puede entender, la importancia de descubrir los procesos y mecanismos por los que una célula integra la información que recibe del exterior, comprueba la fiabilidad de todos sus sistemas internos y se aventura a dividirse, radica en que esos procesos son exactamente los mismos que generan un tumor cuando fallan en una célula humana. Por tanto, además de la fascinación que provoca al investigador el entender estos procesos, este genoma aporta una valiosa información en términos aplicados de cara al avance en la prevención y tratamiento de enfermedades genéticas.

VÍCTOR ALVAREZ TALLADA
Dpto. de Genética
Universidad Pablo de Olavide, Sevilla

Síndrome de Bartter

Bases bioquímicas

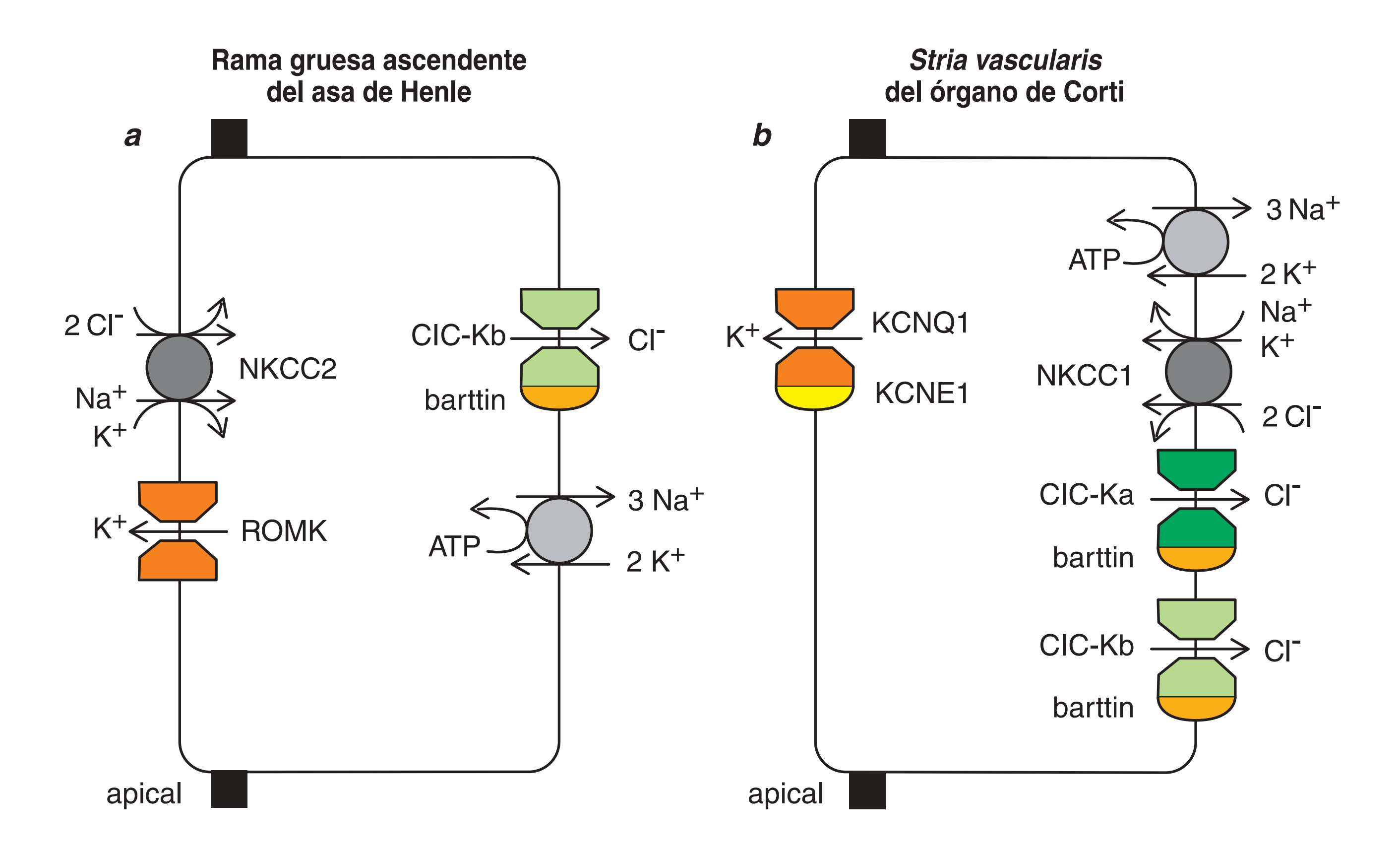
Por síndrome de Bartter se entiende un conjunto de patologías hereditarias que presentan pérdida de sal en la orina, disminución de la concentración de potasio en suero, alcalosis metabólica, incremento de la proteasa renina en suero e hiperaldosteronismo, entre sus síntomas característicos.

Se han identificado tres tipos del síndrome: neonatal, clásico (de aparición en la infancia o niñez) y síndrome de Gitelman (de aparición en la niñez o edad adulta). Las formas neonatal y clásica manifiestan, además, una deteriorada capacidad de concentrar la orina. Algunos pocos afectos con la forma neonatal padecen sordera sensorineural, siendo la sintomatología renal más grave.

¿Cuál es la base bioquímica que subyace bajo estos diferentes fenotipos clínicos? Gracias a estudios genéticos y de biología molecular, se han podido identificar los genes responsables de cada uno de los tipos: el cotransportador de sodio, potasio y cloruro NKCC2 y el canal de potasio ROMK determinan la forma neonatal; la proteína Barttin (subunidad β de los canales de cloruro ClC-Ka y ClC-Kb), la forma neonatal que presenta sordera; el canal de cloruro ClC-Kb interviene en la forma clásica, y, por fin, el cotransportador de sodio y cloruro NCC se halla implicado en el síndrome de Gitelman.

Entre las funciones del riñón sobresale la de controlar la osmolaridad y el volumen de los fluidos internos, mediante la regulación de la concentración de sal. Que el volumen de los fluidos extracelulares sea normal, dependerá de la capacidad de los riñones para ajustar la excreción con la entrada de sal. De hecho, la reabsorción de agua está directamente ligada con la reabsorción de sal. Un elemento clave en la capacidad de regulación del riñón lo constituye el ciclo renina-angiotensina, cuyo elemento limitante es la producción de renina por el aparato yuxtaglomerular (*macula densa*), que actúa a modo de sensor de la concentración de sal.

El transporte de solutos a través de las membranas de las células epiteliales de la nefrona se desarrolla en dos pasos. En el proceso de re-



absorción, el soluto pasa del lumen tubular al citoplasma celular, a través de la membrana apical; se traslada luego al torrente sanguíneo desde la membrana basolateral.

Al analizar el movimiento de un ion, se ha de considerar tanto la diferencia de concentración entre las membranas celulares, como la diferencia de potencial eléctrico, es decir, el gradiente electroquímico de dicho ion.

La absorción de sal se lleva a cabo en la nefrona. Del 100 % de la sal presente en el filtrado glomerular, unos dos tercios se reabsorben en el túbulo proximal. Posteriormente, la rama gruesa ascendente del asa de Henle reabsorbe un 25 % a través del cotransportador NKCC2, que utiliza la energía del gradiente electroquímico creado por la Na^+/K^+-ATPasa presente en el lado basolateral. Dicha enzima transporta tres iones sodio hacia el torrente sanguíneo con consumo de energía (*véase la figura a*).

Para que el transportador NKCC2 siga funcionando, se requiere la actividad conjunta del canal ClC-Kb/Barttin, que conduce el anión cloruro hasta el fluido peritubular, y del canal ROMK, que recicla el catión potasio al lumen. A continuación, el túbulo distal se encarga de un 5 % del filtrado glomerular de sal a través del cotransportador NCC. Por último, en el tubo colector se absorbe el 3 % restante a través del canal ENaC. Se han encontrado también mutaciones en este canal en enfermos con el síndrome de Liddle o con el tipo I de pseudohipoaldosteronismo. Queda, pues, patente, cuán importante es el control estricto de la concentración de sal por el riñón.

Teniendo en cuenta la función y localización subcelular de las proteínas implicadas en el síndrome y considerando la fisiología de los procesos renales, podemos plantear hipótesis que expliquen los diferentes fenotipos clínicos.

Al perderse la actividad de las proteínas NKCC2, ROMK o ClC-Kb, se inhibe la absorción de sal en la rama ascendente del asa de Henle, con la contracción consiguiente del volumen tubular debido a un cambio en la osmolaridad. Esa situación provocará un incremento en la expresión de la proteasa renina por la *macula densa*. La renina inicia el ciclo renina-angiotensina, un proceso proteolítico. Una de las múltiples consecuencias de este ciclo es que aumenta la síntesis de aldosterona por la corteza suprarrenal.

La aldosterona incrementa la vida media del canal de sodio ENaC en la membrana del tubo colector. Dicho incremento se traduce en un mayor flujo de sodio en este segmento, provocando una despolarización de la membrana. Al favorecer la secreción de iones potasio y protones en el lumen, la despolarización explica la alcalosis y la reducción de potasio en el suero. Defectos en el transportador NCC del túbulo distal provocan la misma sintomatología por mecanismos similares, pero la patología no es tan grave debido a la menor importancia de este segmento en la absorción de sal.

Por otra parte, el transporte de sal en la rama gruesa y fina del asa ascendente de Henle es crucial para establecer el mecanismo de contracorriente, esencial para la capacidad renal de concentrar la orina, lo que explica este defecto en las formas neonatal y clásica del síndrome.

¿Por qué las mutaciones en Barttin producen sordera? En la *stria vascularis* del órgano de Corti (oído interno) se segrega potasio en el endolinfo a través del canal KCNQ1/KCNE1 (*véase la figura b*). Se requiere ese ion para el funcionamiento de las células auditivas externas. De ahí que las mutaciones en dicho canal se haya asociado a otros tipos de sordera. La secreción se produce a través de un mecanismo muy similar al que ocurre en el asa de Henle; implican un reciclaje del anión cloruro por los canales ClC-Ka/Barttin y ClC-Kb/Barttin. De esta forma, si no funciona ClC-Kb se produce el síndrome de Bartter; los experimentos demuestran que el ratón "knockout" para el homólogo murino de ClC-Ka presenta *diabetes insipidus* (no concentración de la orina). Al no funcionar Barttin, estas dos actividades se inhiben, lo que explica la mayor severidad del fenotipo renal y la aparición de sordera en esta variante.

RAÚL ESTÉVEZ
ZMNH (Universidad de Hamburgo)

De cerca

Texto y fotos: Sergio Rossi

El sotobosque caducifolio



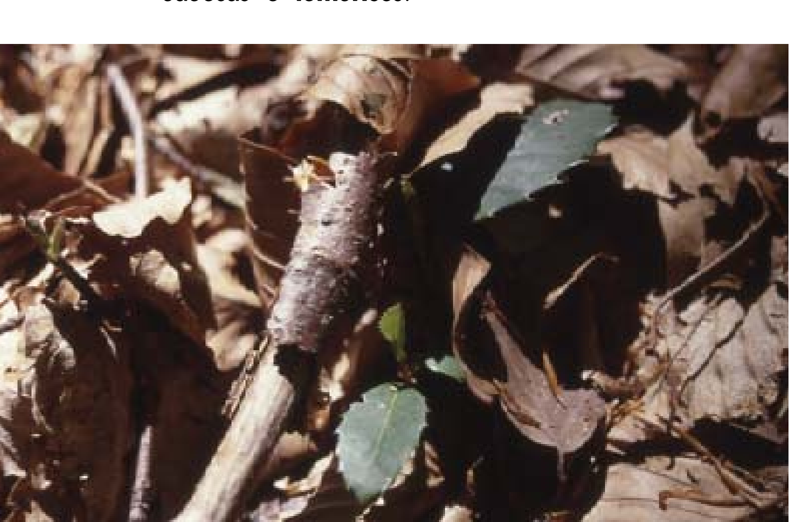
1. Bosque caducifolio del Montseny en primavera, con una gran acumulación de hojarasca bajo el techo protector de la cobertura foliar

En un hayedo o en zonas de chaparral pisaremos sobre un manto de hojarasca, en par ticular si los visitamos durante la estación otoñal. Estos bosques se encuentran en zonas de abundante precipitación o donde el agua se halla presente de un modo más o menos continuo (márgenes de un río, por ejemplo); allí la producción de biomasa en forma de hojas suele ser elevada.

De la hojarasca se aprovechan un sinfín de organismos unicelulares, hongos, plantas y animales. Conforman un entramado complejo. Los hongos, conectados por micorrizas a las radículas de los árboles, se nutren de la materia orgánica en descomposición, lo mismo que gran cantidad de insectos, babosas o lombrices.

El lugar permanece protegido de la luz solar durante la primavera, el verano y una parte del otoño. Medran entonces vegetales que rehúyen la luz intensa. Musgos y helechos, cuyas necesidades hídricas son muy exigentes, buscan refugio bajo la sombra protectora del sotobosque. Las estructuras celulares que revisten la parte externa de estas gimnospermas carecen de los mecanismos que salvan a las angiospermas de una pérdida masiva de agua por evapotranspiración; además, muchas de las primeras precisan, para su reproducción, del agua que sirve de vehículo portador de sus gametos. Hablamos de plantas “primitivas”, es decir, de briófitos y pteridófitos que todavía no explotan flores o inflorescencias para cruzarse entre individuos.

Numerosas angiospermas buscan también ambientes húmedos para persistir, aunque algunas tratan de abrirse paso para convivir o suplir a los árboles que los cubren. Así, no será difícil ver arbolillos con dos o tres hojas que se esfuerzan por superar la cobertura de hojarasca para trepar hacia la luz.



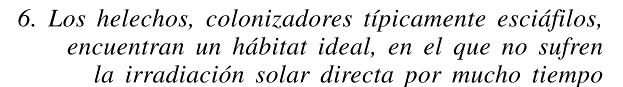
2. Una pequeña encina se abre paso entre el manto de hojas en una de las etapas de vida más difíciles, cuando trata de sobrevivir bajo el resto de la vegetación

3. La enorme cantidad de materia orgánica permite la expansión de un sinfín de hongos, protegidos además de los rayos del sol, perjudiciales para ellos en la mayoría de los casos

4. La mayoría de los musgos, debido a la necesidad de un ambiente con elevada humedad, viven en zonas de umbría bajo el abrigo del bosque



5. Muchos hongos viven largo tiempo en el sotobosque. Este longevo ejemplar de Fomes fomentarius *crece, año tras año, en la base del árbol*



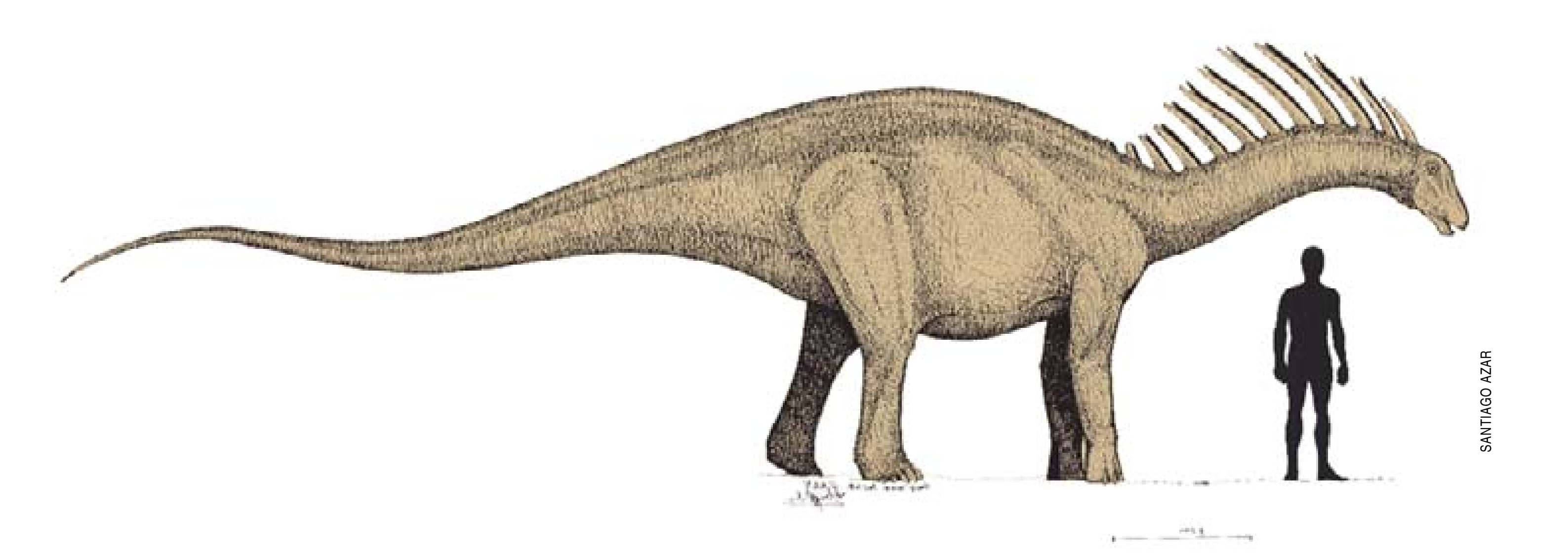
6. Los helechos, colonizadores típicamente esciáfilos, encuentran un hábitat ideal, en el que no sufren la irradiación solar directa por mucho tiempo



Dinosaurios gigantes de la Patagonia

Hace millones de años, los dinosaurios se enseñorearon del planeta. Los saurópodos prosperaron en la Patagonia argentina, dejando innumerables restos óseos y huevos que dan testimonio de su diversidad y comportamiento

Leonardo Salgado y Rodolfo Coria



SANTIAGO AZAR

Uno de los aspectos de los dinosaurios que más atraen la atención es el imponente tamaño. De todos ellos, el grupo de mayor porte ha sido, sin duda, el de los saurópodos, animales fascinantes que, a diferencia de los terópodos —con sus descendientes las aves—, no poseen representantes vivos.

Esos gigantes del Mesozoico hicieron su aparición hace más de 200 millones de años, posiblemente en el Triásico Tardío, y se extinguieron con la mayoría de los dinosaurios hacia finales del Cretácico, hace unos 65 millones de años.

De andar cuadrúpedo, cabeza pequeña y largos cuellos compuestos por un número variable de vértebras, los saurópodos ocuparon el papel de grandes consumidores primarios, especializándose en una dieta herbívora, aunque ignoramos si se alimentaban preferentemente de las copas de los árboles o de arbustos. Sus dientes adoptaron formas que iban desde piezas delgadas y cilíndricas hasta gruesas y espatuladas. Todas las piezas dentarias de saurópodos recuperadas exhiben amplios planos de desgaste, un carácter que no encontramos en los dientes sectoriales y afilados de las formas carnívoras.

Suponemos que su sistema de procesamiento oral de los alimentos no alcanzó el grado de perfeccionamiento de otros grupos de dinosaurios herbívoros, como los ornitisquios (ceratopsios, ankilosaurios, paquicefalosaurios, estegosaurios y ornitópodos). No obstante, su éxito adaptativo y evolutivo es evidente, si se tiene en cuenta el elevado número de especies que se conocen, distribuidas en todos los continentes.

Yacimientos de saurópodos

En Patagonia, la historia de los saurópodos comienza a escribirse con restos procedentes de los yacimientos chubutenses de Cerro Cóndor y Estancia Fernández, en donde afloran sedimentitas de la formación Cañadón Asfalto, de una antigüedad estimativa de 180 millones de años (Jurásico Medio). De Cerro Cóndor se han recolectado numerosos restos aislados o parcialmente articulados, correspondientes a varios individuos. José Bonaparte, uno de los prohombres de la paleontología argentina, llamó respectivamente *Patagosaurus fariasi* y *Volkheimeria chubutensis* a las dos especies de saurópodos identificadas en esa localidad.

Según Bonaparte, *P. fariasi* guarda relación con ciertas formas de la India, mientras que *V. chubutensis* muestra similitud con saurópodos jurásicos de Madagascar. Independientemente de sus posibles relaciones filogenéticas, ambas especies representan diferentes etapas de la evolución de los saurópodos, lo que puede deducirse a partir del distinto grado de complicación de sus vértebras dorsales. De las dos, *P. fariasi* parece ser la que revela caracteres más derivados.

1. *ARGENTINOSAURUS HUINCULENSIS*, a la izquierda, arriba, es el dinosaurio de mayor tamaño hallado hasta el presente. Sus restos aparecieron en la provincia de Neuquén. *Amargasaurus cazaui*, abajo, saurópodo neuquino caracterizado por las espinas neurales alargadas de su cuello, que sobresalían a modo de púas defensivas.



2. MIEMBRO ANTERIOR del saurópodo *Argyrosaurus*, titanosaurio del Cretácico de la provincia del Chubut, montado en el Instituto Miguel Lillo de la provincia de Tucumán. Junto a él, Rodolfo Coria, uno de los autores.

LEONARDO SALGADO

Uno de los aspectos más singulares del yacimiento de Cerro Cóndor es la existencia en una misma localidad de individuos de diferente edad. Apoyados en esa observación, algunos autores apuntan la posibilidad de que estos dinosaurios hayan desarrollado una conducta gregaria de tipo familiar. Los restos de esta agrupación pertenecen a dos individuos adultos y tres juveniles de tamaño distinto. Es posible que esta estructura social haya surgido como una estrategia de defensa, hipótesis propuesta para otros grupos de dinosaurios.

De Estancia Fernández, el segundo yacimiento jurásico, ubicado al norte de Cerro Cóndor, se ha descrito recientemente un nuevo saurópodo: *Tehuelchesaurus benitezi*, un animal, por lo que parece, vinculado a ciertas formas procedentes del Jurásico de China. Lo mismo que las especies anteriores, *T. benitezi* se ha incluido en la familia Cetiosauridae.

En el Jurásico Tardío (hace unos 150 millones de años) los dinosaurios saurópodos se habían ya diferenciado en varias familias, algunas de las cuales sobrevivirán durante el Cretácico. Son muy importantes los yacimientos africanos de esa antigüedad y, sobre todo, los norteamericanos. Lamentablemente, los sedimentos continentales del Jurásico Superior ofrecen una representación muy pobre en Patagonia; hasta hoy no se conocen restos de saurópodos correspondientes a ese período.

Si consideramos que, durante el Jurásico Tardío, Sudamérica y Africa permanecían en contacto, puede suponerse que las faunas de dinosaurios de Patagonia y las africanas poseían mucho en común. Como veremos, todavía en el Cretácico Medio las faunas a ambos lados del incipiente Atlántico Sur no se habían diferenciado de una forma significativa.



3. REPLICA DEL ESQUELETO de *Patagosaurus fariasi*, del Jurásico de la provincia del Chubut, montado en el Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia", de la Ciudad de Buenos Aires.

RODOLFO CORIA

Sin duda, la mayor cantidad de restos de estos gigantes patagónicos procede del Cretácico, período crucial en la historia evolutiva del grupo. Precisamente, el hallazgo de grandes huesos de dinosaurios le permitió al paleontólogo argentino Florentino Ameghino demostrar, a fines del siglo XIX, la existencia de estratos cretácicos en esta parte del planeta.

Promediando este período, en Norteamérica y, en menor medida, en Europa, los ornitisquios (dinosaurios también herbívoros, aunque muy diferentes desde el punto de vista anatómico y filogenético) reemplazan a los saurópodos en el nicho de grandes consumidores primarios. Sin embargo, no se ha podido determinar todavía si la extinción de los saurópodos en esos continentes se debió a la expansión de los ornitisquios o si éstos se limitaron a disponer del espacio que aquéllos dejaron libre al extinguirse. Cualquiera que fuera la causa de ese reemplazo faunístico, lo cierto es que, hacia finales del Cretácico, los saurópodos reaparecen en Norteamérica y Europa, quizá como resultado de una migración desde Sudamérica y Africa, respectivamente.

Los autores

LEONARDO SALGADO y RODOLFO CORIA son paleontólogos argentinos especialistas en reptiles del Mesozoico. Salgado, investigador de los saurópodos patagónicos, ha sido discípulo de José Bonaparte y director del Museo de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional del Comahue. Coria, profesor de ciencias naturales y paleontología, cuenta entre sus principales descubrimientos el único yacimiento monoespecífico de dinosaurios carnívoros registrado en el hemisferio sur.

Continuidad del registro

A diferencia de lo que sucede en el hemisferio norte, el registro de saurópodos, en Patagonia, revela una continuidad a lo largo de todo el Cretácico. Los restos de ese período más antiguos, hallados en rocas del Hauteriviense-Barremiense de hace 125 millones de años, proceden del paraje neuquino de la Amarga, en la provincia del Neuquén. Nos referimos a *Amargasaurus cazaui*, una peculiar especie de dinosaurio caracterizada por una serie doble de largas púas de hueso, que se proyectaban desde el cuello del animal. En realidad, tales prominencias, que se suponen defensivas, no son más que las espinas neurales hipertrofiadas de las vértebras.

Las afinidades más cercanas de *A. cazaui* se dan con *Dicraeosaurus sattleri*, del Jurásico Tardío africano. Proximidad que no debería sorprender, si advertimos que Africa y Sudamérica estuvieron conectadas hasta hace unos 100 millones de años, momento en el cual se produce la apertura del océano Atlántico Sur.

Otros restos igualmente sorprendentes fueron los descubiertos por José Bonaparte en las cercanías de Picún Leufú, también en la provincia del Neuquén. Aparecieron en rocas a las que se les asigna una antigüedad de unos 110 millones de años (edad Aptiana). *Agustinia ligabuei* es el nombre con el que se ha designado a la nueva especie. Estos saurópodos poseían unas estructuras de hueso dérmico exclusivas que sobresalían de su espalda, que le habrían permitido, igual que en el caso de *Amargasaurus*, hacer frente con éxito a los dinosaurios carnívoros.

Agustinia y *Amargasaurus* son los únicos saurópodos conocidos hasta la fecha que poseen estructuras defensivas punzantes de ese tipo. Ahora bien, pese a tal similaridad y encontrarse muy próximos en el espacio y el tiempo, carecen de parentesco próximo. De hecho, las espinas neurales de *Amargasaurus* y las estructuras dérmicas de *Agustinia* tienen muy poco que ver en cuanto a su origen y relaciones anatómicas. No son homólogas.

Resulta manifiesto que las ventajas de contar con tales defensas habrían sido decisivas durante ese tiempo, por cuya razón la selección natural produjo dos veces el mismo resultado, aunque por diferentes caminos. Un motivo plausible de la aparición y mantenimiento de las espinas de hueso podría residir en la presencia en los respectivos ecosistemas de grandes dinosaurios carnívoros, de los que tenemos buenos registros en la región.

Extensión del registro

En el Cretácico Temprano de Patagonia, encontramos restos de saurópodos de dos tipos muy diferentes. Uno de ellos es el de los diplodocoideos (grupo al que también pertenece el dicraeosáurido *Amargasaurus*), animales de porte esbelto caracterizados por sus vértebras altas y miembros anteriores bastante cortos. Los dientes de estos animales eran muy delgados y limitados a la parte anterior de las mandíbulas. Los diplodocoideos, que se diversificaron de un modo notable, abundaron durante el Jurásico Tardío norteamericano. El exponente más conocido de este grupo es *Diplodocus*, del cual existen réplicas montadas en museos de todo el mundo.

Tal vez el diplodocoideo patagónico mejor representado sea *Rebbachisaurus tessonei*, especie emparentada con la forma africana *R. garsabae*. La manifiesta relación entre ambas especies nos enseña, junto con otros indicios geológicos y paleontológicos, que la separación definitiva entre Africa y Sudamérica aún no se había producido o que, al menos, los animales de esa época, a uno y otro lado del Atlántico, no habrían tenido tiempo suficiente para diferenciarse significativamente.

Los restos de *R. tessonei* se desenterraron en la localidad neuquina de El Chocón y los de *Rayososaurus agrioensis* (una forma emparentada con *Rebbachisaurus*) en la localidad de Río Agrio, también en la provincia del Neuquén. Los restos de esta última especie son de edad Aptiana (unos 110 millones de años), es decir, algo más antiguos que los de la primera, que son del Cenomaniense (unos 100 millones de años).

Junto con *R. tessonei* vivió otra especie que reviste particular interés: *Andesaurus delgadoi*. Este animal pertenece al otro grupo de saurópodos a que nos referimos —los titanosauriformes—, que serán muy abundantes en el Cretácico Tardío de todo el mundo ya que, además de en Sudamérica, se registran en Europa, Africa, Asia, Norteamérica y Australia.

Tal vez uno de los titanosauriformes mejor conocidos del Cretácico Temprano de Patagonia sea *Chubutisaurus insignis*, un animal de importantes dimensiones, originalmente asignado a una nueva familia: los chubutisáuridos. Como indica su nombre, los restos de *Chubutisaurus* se descubrieron en la provincia del Chubut, en rocas de una antigüedad de 110 millones de años (edad Aptiana).

Declive de los diplodocoideos y auge de los titanosaurios

Hacia finales del Cenomaniense, los diplodocoideos se extinguen en todo el mundo. El registro fósil subsiguiente está dominado por saurópodos titanosauriformes. Probablemente, la clave para entender el declive de los diplodocoideos y la posterior expansión de los titanosauriformes a partir del límite Cenomaniense-Turoniense (hace unos 90 millones de años) se encuentre en sus diferentes estilos masticatorios y su vinculación con dietas distintas.

En efecto, como ya se ha dicho, los diplodocoideos poseen dientes delgados, cilíndricos y restringidos al extremo de las mandíbulas, en tanto que los titanosauriformes basales (tales como la forma afronorteamericana *Brachiosaurus*), aquellos que existían durante el Cenomaniense, poseían dientes gruesos y espatulados.

Cabe, pues, que la decadencia y desaparición de los diplodocoideos, a fines del Cenomaniense, hayan estado vinculadas a variaciones en la composición florística y a la eventual retracción de ciertos elementos vegetales que componían la dieta regular de estos animales. Sin embargo, los titanosauriformes desarrollaron muy pronto una dentición cilíndrica, luego de la desaparición de los diplodocoideos, lo que supone un nuevo cambio en la composición de la flora.

Independientemente de lo anterior, es posible establecer que hacia el límite Cretácico Temprano-Cretácico Tardío (hace unos 100 millones de años), los titanosauriformes más derivados que *Brachiosaurus* (grupo que se ha denominado Titanosauria) gozaban de una distribución mundial. En realidad, los titanosaurios habrían alcanzado una distribución global ya durante el Cretácico Temprano, manteniendo su presencia en todos los continentes a lo largo del período entero.

Los titanosaurios poseen una serie de caracteres anatómicos novedosos, entre ellos, el pubis más largo que el isquion y ahusadas cavidades laterales llamadas pleurocelos en las vértebras dorsales. El origen de los titanosaurios se encuentra posiblemente en el Jurásico Tardío, ya que el género *Janenschia*, considerado el grupo más antiguo, se registra en rocas de esa antigüedad en el este africano.

Los titanosáuridos (definidos aquí como titanosaurios más derivados que *Andesaurus*) son los grandes



LEONARDO SALGADO

4. HUEVO DE TITANOSAURIO hallado en Auca Mahuevo, Cretácico de la provincia del Neuquén.



5. GRUPO de voluntarios extrayendo una enorme vértebra de *Argentinosaurus*.

saurópodos dominantes del Cretácico Tardío. Portan un rasgo distintivo que permite su inmediato reconocimiento: las vértebras de la cola poseen la cara anterior cóncava y la posterior fuertemente convexa (condición procélica). Sus dientes, cilíndricos y delgados, recuerdan los de los diplodocoideos del Cretácico Temprano. Destacan sus anchas caderas, debido a la prolongación de las costillas del sacro. Los ileones están muy expandidos hacia fuera, como ocurre en otros grupos de dinosaurios, así los ankilosaurios.

Por su abundante registro en la India, Madagascar y, sobre todo, en América del Sur se les venía atribuyendo un origen gondwánico. Sin embargo, el origen de los titanosáuridos bien pudo haberse dado en Europa, si nos apoyamos en el hallazgo de *Luticosaurus valdensis*, un titanosáurido del Barremiense de Gran Bretaña.

Según avanzamos, los titanosáuridos se habrían extinguido en Europa durante el Cenomaniense, para reintroducirse desde Africa en el Campaniense Tardío. En opinión de algunos paleontólogos, esta extinción coincidiría con la de los saurópodos norteamericanos. En todo caso, es probable que la temprana dispersión de los titanosáuridos desde su posible centro de origen, Europa, hacia Sudamérica, por un lado, e India-Madagascar, por el otro, se haya producido en un período no posterior al Albiense-Cenomaniense. José L. Sanz defiende que los titanosáuridos del Cretácico Tardío habrían evolucionado a partir de un linaje euro-americano, representado por *Luticosaurus,* y de otro linaje occidental, el del género africano *Malawisaurus*. De cualquier forma, las hipótesis paleobiogeográficas que se han propuesto son aún precarias, ya que no conocemos las relaciones filogenéticas de la mayoría de los titanosáuridos europeos y se encuentran muy pobremente representados los titanosáuridos africanos del Cretácico Superior.

En Patagonia existen numerosos restos de titanosáuridos, más que en ninguna otra parte del planeta. Los primeros restos de este grupo fueron hallados por soldados expedicionarios durante el decenio de 1880 y reconocidos como tales a partir de los trabajos emprendidos por el paleontólogo británico Richard Lydekker, un pionero en el estudio de los reptiles mesozoicos de Sudamérica.

Los ha habido de diverso porte. *Neuquensaurus australis* y *Rocasaurus muniozi* eran medianos; gigantesco, *Argentinosaurus huinculensis*. Este último, el mayor dinosaurio del mundo, habría superado los 40 metros de largo, una talla no reeditada por ningún otro animal en la historia evolutiva del planeta. El epíteto de especie evoca la localidad neuquina de donde proceden los restos: Plaza Huincul. La antigüedad estimada para este saurópodo se cifra en 95 millones de años.

Una característica llamativa de *Argentinosaurus* son las articulaciones accesorias en sus vértebras dorsales, que habrían reforzado la columna vertebral. Algo comprensible, si nos fijamos en su enorme peso: más de 100 toneladas. Otros titanosáuridos más recientes al-



6. EXCAVACION DE UN TITANOSAURIO en Auca Mahuevo, en las proximidades del yacimiento de huevos fósiles.

CORTESIA DEL MUSEO "CARMEN FUNES" (*arriba*); LEONARDO SALGADO (*abajo*)

canzaron también tamaños notables, aunque sin llegar a las medidas de *Argentinosaurus*: *Antarctosaurus giganteus*, de la localidad de China Muerta en la provincia del Neuquén, y *Argyrosaurus superbus*, de la provincia del Chubut.

Titanosáuridos de Sudamérica

Los saltasaurinos, subfamilia de titanosáuridos hasta ahora sólo registrada en Sudamérica, comprenden tres especies: *Saltasaurus loricatus*, *Neuquensaurus australis* y *Rocasaurus muniozi*. Sus restos aparecieron en las provincias argentinas de Salta, Neuquén y Río Negro. Es sugestiva la ausencia de saltasaurinos al sur de los 42º de latitud sur. Ausencia que pudiera deberse a las limitaciones del registro paleontológico, aunque no hemos de descartar la barrera geográfica del macizo norpatagónico al sur de la provincia de Río Negro. Ese obstáculo en el límite con la Provincia del Chubut pudiera haber resultado insuperable para los titanosaurios mencionados.

Las tres especies conocidas de saltasaurinos comparten muchos rasgos. Todas presentan las vértebras de la cola compuestas por hueso cavernoso, mientras que en el resto de los titanosáuridos dicho tipo de tejido se limita a las vértebras dorsales. Se trata de formas de pequeño tamaño (considerando que son saurópodos) y entre sus características más sobresalientes se halla el aplastamiento dorso-ventral de las vértebras caudales. Tienen, además, placas de hueso a modo de escudos, con una cresta longitudinal sobre la cara ventral. No se sabe si estas placas óseas, que se observan también en otros titanosáuridos, cumplían la función de defensa que algunos autores propusieron.

Según parece, los titanosáuridos de la subfamilia de los saltasaurinos son exclusivos del Cretácico Tardío (Campaniense-Maastrichtiense), por lo que su radiación habría ocurrido durante un lapso de tiempo muy breve. Excepto en la localidad de El Brete, en la provincia de Salta, en donde los saltasaurinos son los únicos saurópodos registrados, en la mayoría de las localidades del norte de Patagonia coexistieron con otros parientes cercanos, como *Titanosaurus*, *Aeolosaurus* y *Pellegrinisaurus*, además de otros géneros indeterminados.



7. RESTOS EMBRIONARIOS craneanos de titanosaurios incluidos en huevos fósiles del yacimiento de Auca Mahuevo, provincia del Neuquén.

LEONARDO SALGADO Y RODOLFO CORIA

Huevos y nidos

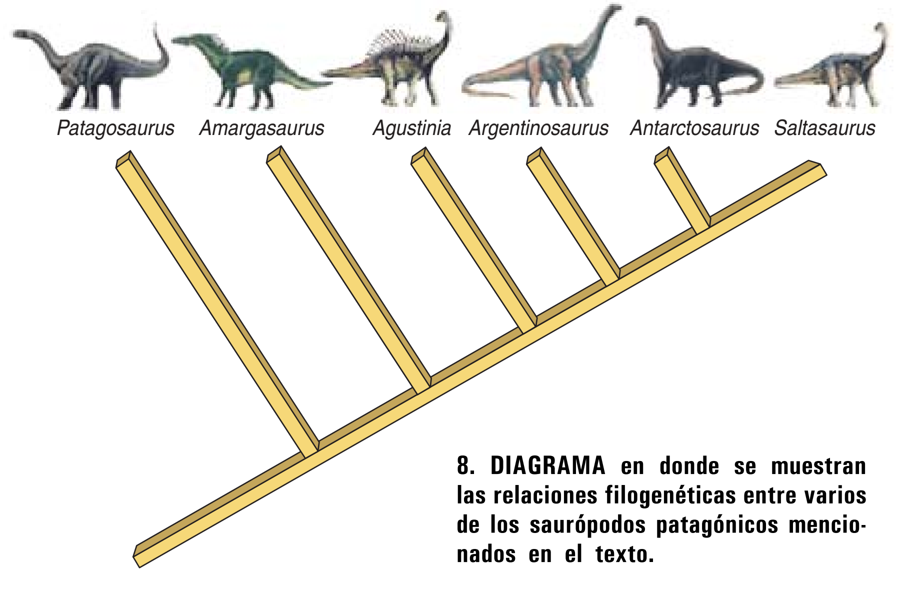
Los titanosáuridos patagónicos no sólo nos han dejado sus restos óseos, sino también sus huevos. El sitio de nidación más espectacular se encuentra en el yacimiento neuquino de Auca Mahuevo, cerca de la ladera sur del volcán Auca Mahuida. Se han conservado allí al menos cuatro horizontes portadores de huevos, muchos de los cuales, adheridos a sus paredes internas, contienen los restos óseos de los embriones y algunos fragmentos de piel embrionaria.

El tipo de información que brindan estos fósiles nos permite conocer aspectos fundamentales de la vida de los dinosaurios. En particular, la biología de la reproducción y del comportamiento reproductivo sólo puede obtenerse a partir de los huevos y sus contenidos embrionarios.

Los huevos hallados en Auca Mahuevo, esféricos, muestran un tamaño bastante pequeño (unos 15 cm de diámetro). Las cáscaras son delgadas (2 mm de espesor) y ornamentadas. En la provincia de Río Negro se han recuperado huevos de otro tipo (también asignables a titanosáuridos), algo mayores (unos 18 cm de diámetro), y con cáscaras más gruesas (hasta 5 mm de espesor). La microestructura de las cáscaras de los huevos difiere de unos a otros.

Los restos embrionarios, entre los que se incluyen varios cráneos en buen estado de conservación, permiten observar una serie de modificaciones ontogenéticas notables, como el desplazamiento de las narinas externas: mientras que en los saurópodos adultos se encuentran parcialmente retraídas, en los embriones se hallan en posición terminal.

Además, el yacimiento de Auca Mahuevo ha posibilitado el conocimiento de aspectos relevantes de los hábitos reproductivos de este tipo de saurópodo. Tres en particular: la reproducción ovípara, la puesta de huevos en forma gregaria y la fidelidad al sitio. Antes del descubrimiento de los huevos con embriones de Auca Mahuevo, algunos autores creían que los saurópodos parían crías vivas, en una suerte de ovoviviparismo, debido a la ausencia de huevos con embriones en el registro fósil. Auca Mahuevo demuestra sin ambigüedad que al menos este tipo de saurópodo ponía huevos en el sustrato y que los mismos se desarrollaban fuera del vientre de la madre.



8. DIAGRAMA en donde se muestran las relaciones filogenéticas entre varios de los saurópodos patagónicos mencionados en el texto.

Por lo que atañe a la puesta gregaria, ésta se hace patente en la enorme extensión del sitio de anidación de Auca Mahuevo. De acuerdo con las últimas excavaciones, alcanza más de 20 km. Se ve que participaron varias hembras en la puesta, congregadas al mismo tiempo en el mismo lugar. Por fin, la identificación de al menos cuatro horizontes geológicos portadores de huevos, todos de la misma especie, indica que este tipo de saurópodo prefería un lugar determinado para la puesta, al que regresaban periódicamente.

Gigantismo

¿Cuáles fueron las circunstancias que favorecieron la aparición de *Argentinosaurus* y otros dinosaurios de más de 100 toneladas? Varias son las hipótesis avanzadas para explicar el gigantismo de los dinosaurios. Para unos autores, respondería a una estrategia de termorregulación, mediante la cual mantenían constante la temperatura corporal, debido a la baja relación superficie-volumen que muestran los cuerpos de gran tamaño. Sin embargo, no parece ser eso motivo suficiente para dar cuenta del tamaño de *Argentinosaurus*, ya que los modelos matemáticos establecen que la homeotermia se alcanzaría al superar cierto tamaño, muy por debajo del que este animal alcanzó.

Para otros autores, el tamaño imponente de los saurópodos sería una adaptación para alimentarse de las copas de las coníferas. El problema a resolver sería, en todo caso, no tanto la aparición de grandes dinosaurios cuanto la ausencia de dinosaurios de pequeño tamaño. De acuerdo con esta interpretación, los mamíferos y lagartos pequeños podrían haber poseído alguna ventaja selectiva sobre los dinosaurios de talla pareja.

Entre los factores positivos de selección que habrían operado a favor del gigantismo de los dinosaurios se invocan diversas causas, amén de las mencionadas termorregulación y posibilidad de acceso a las altas coronas de los árboles. Se citan la fisiología digestiva, las interacciones predador-presa y la dinámica reproductiva.

Se ha sugerido también que un aumento en la tasa de crecimiento ontogenético habría llevado a un aumento del tamaño corporal y a una menor mortalidad de los adultos, permitiendo así un mayor potencial reproductivo del grupo. El crecimiento rápido, sobre todo en el primer año, habría tenido que ver no ya con la necesidad de superar pronto el tamaño máximo admitido por los predadores, sino, en particular, con la exigencia de alcanzar presto el grado de homeotermia.

De cualquier modo, si un tamaño grande es beneficioso, resulta evidente que la selección natural debería primar un incremento en la tasa de crecimiento, de manera tal que las ventajas brindadas por el gigantismo puedan ser aprovechadas rápidamente. Otra explicación posible es que la presión de selección ejercida por numerosos dinosaurios juveniles, compitiendo por los recursos alimentarios, haya favorecido a los individuos dotados de una tasa de crecimiento ligeramente superior a la del resto.

Todo ello se enmarca con la distinción hecha por algunos entre situaciones ecológicas que favorecen el desarrollo de especies de gran tamaño (por ejemplo, los ambientes de intensa competencia entre individuos juveniles) y las que no lo hacen. Que *Argentinosaurus* haya vivido en un ambiente beneficioso para el tamaño está avalado por la presencia, en los mismos o en niveles estratigráficos equivalentes, de otros dinosaurios gigantescos, como los terópodos *Giganotosaurus* y otro recientemente hallado en el paraje Cortaderas, en la provincia del Neuquén.

Pese a la insuficiencia de las pruebas disponibles, es posible que el desarrollo de formas gigantes en Patagonia se halla dado principalmente durante el Cretácico, en tanto que en Norteamérica y en otros continentes las especies de mayor tamaño parecen corresponder al Jurásico. En cualquier caso, el conjunto faunístico registrado en el Cretácico de Patagonia, del cual los saurópodos forman parte esencial, es único en su tipo, con especies de gran tamaño y estructuras novedosas, sin parangón en otros sitios del planeta.

DIBUJOS DE CARLOS PAPOLIO

Bibliografía complementaria

DINOSAURIOS DEL JURÁSICO DE AMÉRICA DEL SUR. J. F. Bonaparte en *Investigación y Ciencia*, págs. 110-121, diciembre de 1981.

LOS DINOSAURIOS DE LA PATAGONIA ARGENTINA. J. F. Bonaparte. Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia; Buenos Aires, 1998.

ENCYCLOPEDIA OF PALEONTOLOGY. Dirigido por R. Singer. Fitzroy Dearborn Publishers; Chicago, Londres, 1999.


JAMES WORRELL

Exitos y limitaciones de un corazón artificial

Transcurrido un año desde que los médicos comenzaron a implantar el AbioCor en pacientes moribundos, las perspectivas de este corazón artificial son inciertas

Steve Ditlea

Durante mucho tiempo, la sustitución permanente de un corazón humano, en situación funcional de fracaso total, por un dispositivo mecánico implantado en el cuerpo del paciente ha constituido uno de los objetivos que se han mostrado más esquivos para la medicina. El pasado año esta aventura entró en una nueva y crucial fase, cuando en hospitales estadounidenses se iniciaron los ensayos clínicos preliminares con una máquina construida con plástico y titanio. Del tamaño de un pomelo, AbioCor, así se llama el ingenio, ha sido desarrollado por Abiomed, una compañía con sede en Danvers, Massachusetts.

El AbioCor es el primer corazón artificial que puede incluirse íntegro dentro del cuerpo de un paciente. Los primeros corazones artificiales, como el Jarvik-7, que consiguió notoriedad mundial en los años ochenta, mantenían al individuo ligado a un compresor de aire externo. Con el AbioCor, sin embargo, no se necesitan tubos ni cables que atraviesen la piel del paciente. En julio de 2001, Robert L. Tools, de 56 años, cuyo corazón había llegado a un punto tal de debilidad, que ya no podía bombear la sangre, fue el primer receptor de este corazón artificial.

Durante los nueve meses siguientes a esta primera implantación, los cirujanos sustituyeron por un AbioCor los corazones funcionalmente extenuados de otros seis pacientes. Pero los ensayos iniciales han producido resultados dispares. A finales de junio del año en curso, 5 de los 7 pacientes habían fallecido: 2 en el mismo día de la implantación quirúrgica, 1 en los dos meses siguientes a la misma y 2 dentro de un período de cinco meses tras la operación. (Tools murió el mes de noviembre de 2001.) Uno de los dos supervivientes llevaba en aquella fecha más de ocho meses con el corazón artificial y el otro, más de seis.

Dado que todos los pacientes se encontraban muy graves —sólo eran elegibles para la implantación aquellos cuyo pronóstico de vida no superaba los 30 días—, los responsables de Abiomed sostienen que, a tenor de los resultados, el corazón artificial en fase de ensayo merece la pena. La compañía, no obstante, es consciente de que un defecto en las conexiones del corazón artificial con el cuerpo del paciente puede haber propiciado la formación de los coágulos que provocaron accidentes cerebrovasculares en tres de los enfermos.

Con unos ensayos clínicos que se iniciaron no hace más de un año, obviamente es demasiado pronto para poder determinar si el AbioCor constituirá un avance importante o un espejismo. Si el departamento de Administración de Alimentos y Fármacos de los Estados Unidos llegase a la

1. ABIOCOR, un corazón artificial fabricado con plástico y titanio, ha estado sometido a ensayos clínicos durante el pasado año.

conclusión de que los primeros resultados son prometedores, esta decisión podría permitir a la empresa Abiomed comenzar la implantación del AbioCor en pacientes cuyo estado de gravedad no fuera el extremo de los elegidos para el grupo inicial del ensayo. Los directivos de la compañía esperan que, en su momento, el porcentaje de supervivencia tras la implantación del corazón artificial sobrepase el porcentaje de supervivencia tras un trasplante cardíaco (alrededor del 75 % de los receptores de corazones procedentes de donantes siguen con vida a los cinco años del trasplante). No llegan a 2500 los donantes de corazón anuales en los Estados Unidos, país que cuenta con más de 4000 pacientes en lista de espera para trasplantes; el AbioCor podría convertirse en la tabla de salvación de muchos de ellos.

Pero el corazón artificial entra en liza con otros tratamientos menos radicales. Uno de éstos produce resultados muy satisfactorios. Los médicos han logrado restablecer una función cardíaca adecuada en miles de pacientes con la ayuda de una bomba adjunta al ventrículo izquierdo, la cavidad cardíaca que habitualmente falla. En un principio, este dispositivo de ayuda ventricular se aplicaba como medida terapéutica urgente, y a corto plazo, en pacientes que aguardaban un trasplante. Pero ciertos estudios recientes han demostrado que estas bombas supletorias pueden mantener con vida a los pacientes durante dos o más años.

Al propio tiempo, otras investigaciones han echado por tierra el paradigma sobre la reparación cardíaca construido a lo largo de generaciones de médicos. De acuerdo con tales trabajos, el corazón humano podría repararse a sí mismo, mediante la regeneración de nuevas fibras musculares. Varios grupos de investigadores compiten ahora en el desarrollo de procedimientos

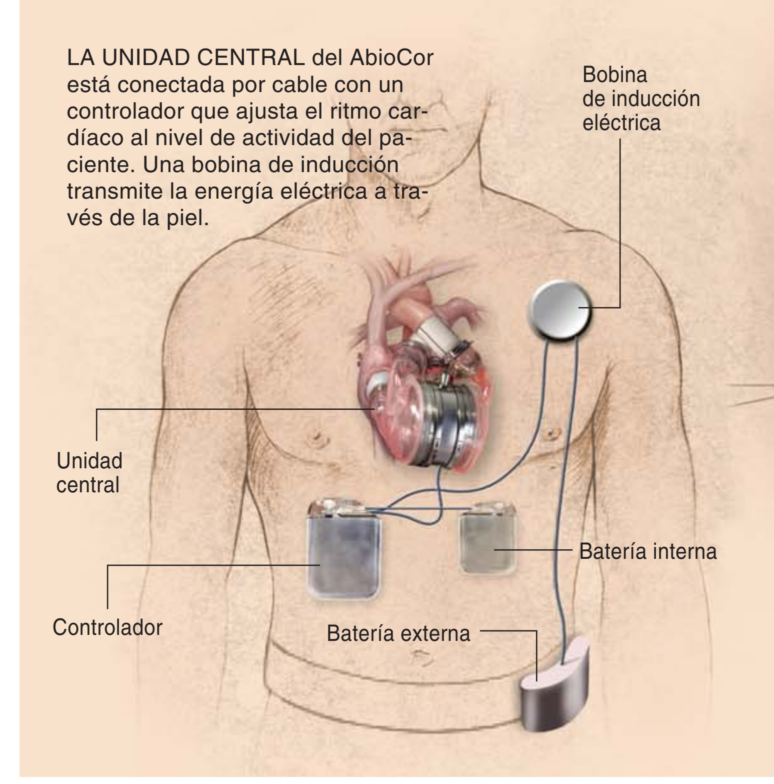
Resumen/*Corazón AbioCor*

- El objetivo de la implantación de un sustituto mecánico permanente para un corazón humano en estado de fracaso funcional terminó por abandonarse, casi del todo, tras los controvertidos intentos realizados en el decenio de los ochenta. Los ensayos clínicos con el AbioCor, un nuevo modelo de corazón artificial diseñado para su implantación total en el cuerpo del paciente, comenzaron en julio del año 2001.
- Los ensayos han cosechado resultados dispares. De los siete pacientes gravemente enfermos a los que se implantó el AbioCor, dos murieron en el mismo día de la implantación, otro en el intervalo de los 60 días siguientes y dos más en el arco de cinco meses tras la operación. Aunque este corazón artificial no provocaba infecciones, tres intervenidos sufrieron accidentes cerebrovasculares.
- Si el porcentaje de supervivencia tras la implantación del AbioCor mejora, podría convertirse en una opción alternativa para los enfermos que llevan largo tiempo en lista de espera para trasplante cardíaco. Pero el AbioCor tiene que competir con tratamientos menos radicales, como son los dispositivos mecánicos de asistencia ventricular y los tratamientos que utilicen células madre.

Lo mismo que el corazón humano, el AbioCor tiene cavidades para bombear la sangre en sus mitades derecha e izquierda. La sangre oxigenada en los pulmones fluye hacia la cavidad o cámara izquierda, de donde también sale; la sangre con sus existencias de oxígeno ya agotadas, tras haber circulado por el cuerpo, entra y sale de la cavidad derecha. Entre ambas cavidades o cámaras del AbioCor se encuentra el mecanismo que desempeña las funciones de las paredes cardíacas: un dispositivo herméticamente sellado que genera los movimientos de bombeo de la sangre.

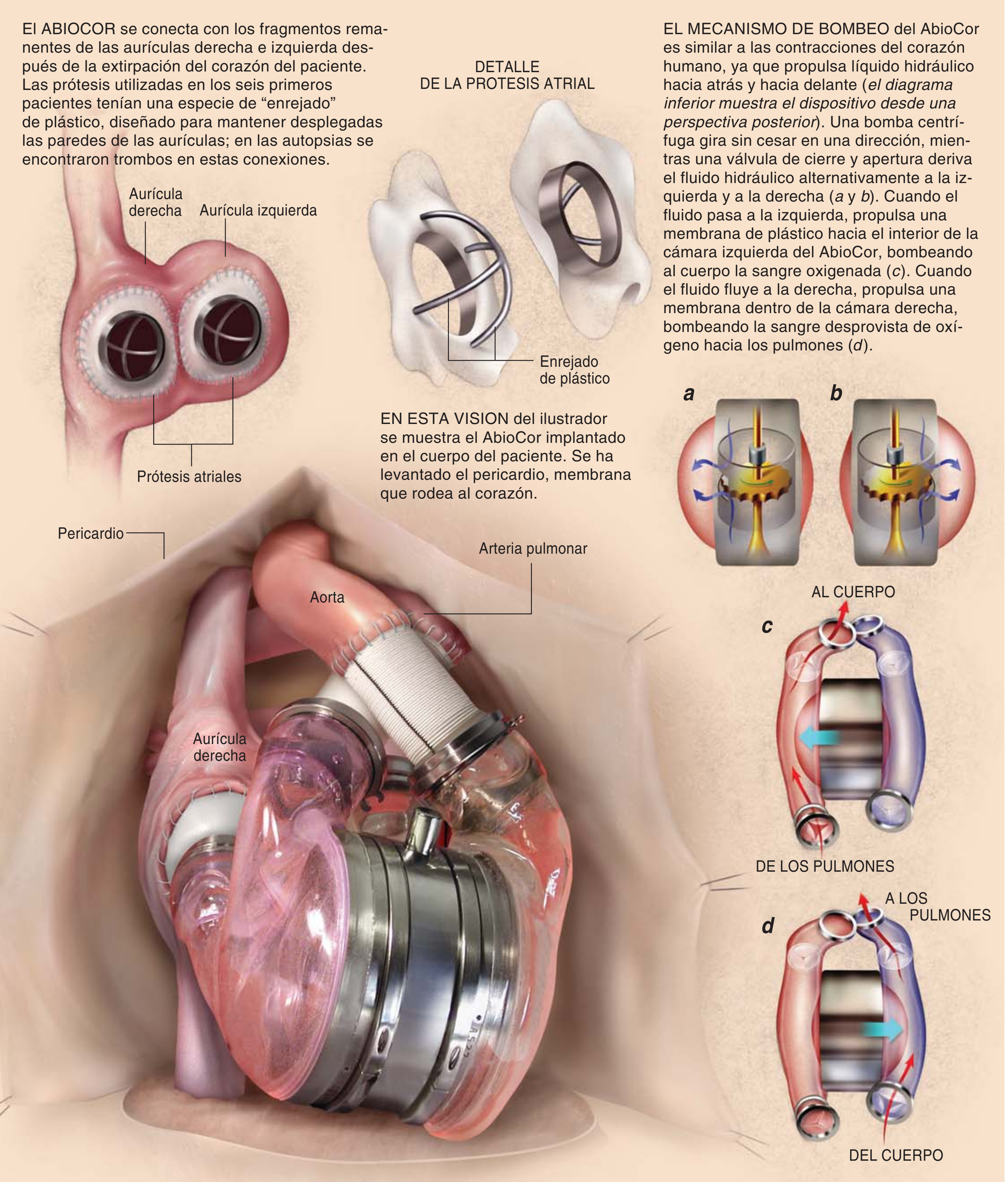
En el centro de este mecanismo, un motor eléctrico hace girar una bomba centrífuga, miniaturizada, entre 5000 y 9000 rotaciones por minuto. La bomba propulsa un líquido viscoso hidráulico; un segundo motor eléctrico hace girar una válvula de cierre y apertura, que permite al fluido entrar y salir de las dos secciones externas del mecanismo de bombeo, de modo alternativo. Cuando el fluido llena la sección izquierda, su membrana de plástico se proyecta hacia fuera, con lo que expulsa la sangre de la cámara izquierda del AbioCor. Simultáneamente, el fluido hidráulico sale de la sección derecha, con lo que su membrana se desinfla, lo que permite a la sangre penetrar en la cámara derecha del AbioCor.

Las cuatro válvulas del AbioCor están fabricadas con plástico y configuradas como las válvulas cardíacas naturales. Los conductos para la entrada de la sangre se hallan conectados a las aurículas izquierda y derecha del corazón extirpado, y los conductos de salida a las arterias aorta y pulmonar. El corazón artificial pesa alrededor de 1 kilogramo y consume unos 20 watt de energía eléctrica. La batería interna, la bobina de inducción eléctrica y el módulo de control añaden otro kilogramo al sistema implantado. Las baterías de litio colocadas en el cinturón del paciente recargan sin cesar la batería interna mediante la bobina de inducción. Una consola junto a la cama puede servir también de fuente de energía eléctrica y de control. *—S.D.*



LA UNIDAD CENTRAL del AbioCor está conectada por cable con un controlador que ajusta el ritmo cardíaco al nivel de actividad del paciente. Una bobina de inducción transmite la energía eléctrica a través de la piel.

ASI FUNCIONA EL ABIOCOR



KEITH KASNOT

ETICA DEL CORAZON

Los ensayos clínicos del AbioCor plantean algunas cuestiones morales

Durante los ensayos clínicos del corazón artificial Jarvik-7, los especialistas en ética médica mostraron su preocupación por el sufrimiento de los pacientes y por la abrumadora cobertura mediática que se lanzó sobre ellos. Ahora, aquellas cuestiones han reaparecido con los ensayos humanos del AbioCor. Los bioéticos reparten sus interrogantes entre Abiomed (los fabricantes del corazón artificial), los médicos y la prensa.

"Los problemas éticos fundamentales para el paciente siguen siendo los mismos", sostiene Arthur Caplan, director del Centro de Bioética de la facultad de medicina de la Universidad de Pennsylvania. "En primer lugar, ¿se puede conseguir un verdadero consentimiento informado de una persona desesperadamente moribunda? Estar muriéndose es una situación extremadamente coercitiva. Son pocas cosas las que no pueden conseguirse de una persona que se está muriendo." A favor de Abiomed, Caplan valora las 13 páginas del modelo de consentimiento informado de la firma como muy exigentes desde el punto de vista del descubrimiento de riesgos; elogia, además, que haya previsto fondos para un grupo independiente de abogados que informen a los pacientes y a sus familias. Pero Caplan se pregunta si son reclutados los pacientes apropiados para los ensayos clínicos: "Yo he sostenido que no tiene sentido ensayar algunos tratamientos en los enfermos de mayor gravedad, pues no se dispone del tiempo suficiente para separar lo que puede ser causado por la enfermedad de lo que tiene su origen en el dispositivo mecánico implantado."

George J. Annas, docente en la Escuela de Salud Pública de la Universidad de Boston, sostiene que el procedimiento para el consentimiento informado diseñado para el AbioCor "debe ser más detallado en lo que se refiere a la descripción de cómo va a morir el paciente. Ninguno de estos pacientes va a vivir mucho tiempo. Deben hacer sus planes para morir. ¿Cómo va a suceder? ¿Quién va a tomar las decisiones y en qué circunstancias?". En dos casos, durante los ensayos clínicos, miembros de las familias estuvieron de acuerdo en retirar el suministro eléctrico que alimentaba el AbioCor, prescindiendo del sistema de alarma, para permitir que pudieran morir unos pacientes que se encontraban en fracaso terminal.

Otra fuente de controversia reside en la política informativa restrictiva de la compañía Abiomed sobre los ensayos. A modo de ejemplo, los directivos no descubrieron la identidad de un paciente hasta 30 días después de la implantación (no obstante, filtraciones en el propio hospital habían forzado a la compañía a hacerlo antes de lo previsto). Aunque estas medidas han evitado la repetición del escandaloso tratamiento mediático que rodeó al modelo de corazón artificial Jarvik-7, algunos profesionales de la ética médica han llamado la atención sobre la necesidad de que los problemas médicos que se presenten durante los ensayos humanos sean dados a conocer en toda su amplitud. Renée Fox, profesora de ciencias sociales en la Universidad de Pennsylvania, ha subrayado que, por lo general, las noticias facilitadas por Abiomed acerca de los aspectos negativos se han proporcionado en el momento oportuno. "Sin embargo —añade— ha habido una tendencia por parte de la compañía y de los médicos a interpretar los resultados negativos como si no tuvieran relación con el corazón implantado. En cada caso se ha intentado decir que el problema se ha debido a una enfermedad subyacente en el paciente, no a los trastornos inducidos por el dispositivo implantado."

Los bioéticos denuncian que los periodistas también han cometido errores al escribir relatos en exceso optimistas acerca del AbioCor. Fue un esperanzador artículo publicado en la revista *Newsweek* el que convenció a Robert L. Tools a presentarse como voluntario para el primer implante. Robert Munson, profesor de filosofía de la ciencia y la medicina en la Universidad de Missouri, St. Louis, sentencia: "La prensa no debe convertirse en evangelista de un procedimiento médico". *—S.D.*

terapéuticos que utilizan células madre que pueden ayudar *in situ* a la curación del corazón.

Historia del corazón artificial

Los orígenes del corazón artificial se remontan a hace medio siglo. En 1957 Willem J. Kolff (inventor de la máquina para diálisis) y Tetsuzo Akutsu, de la Clínica Cleveland, sustituyeron el corazón de un perro con un dispositivo mecánico construido con cloruro de polivinilo, que operaba mediante una bomba de aire; el animal sobrevivió unos 90 minutos. Siete años más tarde, el presidente Lyndon B. Johnson estableció en los Institutos Nacionales de la Salud (NIH) un programa para el desarrollo de un modelo de corazón artificial. En el año 1969, Denton A. Cooley, del Instituto de Cardiología de Texas en Houston, implantó el primer corazón artificial en humanos, aunque solamente como una medida de urgencia. El dispositivo implantado tenía por misión mantener con vida al paciente durante 64 horas, hasta que se encontrara un corazón humano apropiado. (Vivió hasta recibir el trasplante cardíaco, aunque murió dos días y medio más tarde.) El segundo implante de un corazón artificial no se intentó hasta 1981; el paciente vivió 55 horas con ese dispositivo, pensado como un método que sirviese de "puente" hasta recibir un trasplante cardíaco, pero falleció antes de obtenerlo.

Entonces llegó el momento del ensayo clínico de mayor resonancia mediática en la medicina moderna: los cuatro implantes permanentes del modelo de corazón artificial Jarvik-7, realizados por el cirujano car-

díaco William DeVries en el año 1982, en la facultad de medicina de la Universidad de Utah. De la noche a la mañana, el paciente Barney B. Clark se convirtió en una celebridad. Con periodicidad casi diaria se emitía su parte médico. Los periodistas trataban de introducirse clandestinamente en la unidad de cuidados intensivos, escondidos en cestas de la lavandería del hospital o disfrazados de médicos. Para cuando Barney murió a los 112 días de la operación —debido a un fracaso multiorgánico después de padecer numerosas infecciones— los medios de información habían facilitado ya una detallada crónica de los problemas clínicos y de los sufrimientos de Barney.

No habían transcurrido dos años cuando DeVries realizó su segundo implante de un Jarvik-7. El receptor se llamaba William Schroeder y la operación se llevó a cabo en el Hospital Norton Audubon en Louisville, Kentucky. Schroeder sobrevivió 620 días con su corazón artificial, el período más largo hasta la fecha, pero a costa de un tremendo sufrimiento: accidentes cerebrovasculares, infecciones y fiebre; durante un año, además, se alimentaba a través de una sonda. El tercer paciente implantado con un Jarvik-7 vivió 488 días y el cuarto receptor murió a los 10 días. Aunque varios hospitales han venido utilizando con éxito, en cientos de pacientes, una versión algo más ligera del Jarvik-7, como dispositivo "puente" hasta el trasplante, la mayoría de los cirujanos han terminado por desechar la idea del recurso a un corazón artificial permanente.

De muy otra manera pensaba David Lederman, ingeniero de profesión. Se hallaba convencido de que valía la pena proseguir con las posibilidades de un corazón artificial permanente. Había trabajado en el desarrollo de un corazón artificial para una compañía dedicada a la investigación médica, que era subsidiaria de la compañía aerospacial Avco. En 1981 fundó Abiomed.

Con sus colaboradores, analizó cuidadosamente los ensayos clínicos del modelo Jarvik-7 y buscó la forma de mejorarlo: el compresor de aire externo que hacía funcionar el Jarvik-7 era voluminoso y ruidoso; las bacterias podían instalarse con suma facilidad en los puntos donde los tubos del compresor atravesaban la piel del paciente; además, el Jarvik-7 presentaba en su superficie irregularidades, sitios proclives para la formación de trombos por plaquetas y leucocitos, coágulos que, al desprenderse, serían los causantes de los frecuentes accidentes cerebrovasculares que se habían observado en los pacientes implantados.

En el año 1988 el Instituto Nacional del Corazón, Pulmón y Sangre, filial de los NIH, decidió suspender la financiación para las investigaciones dedicadas a la búsqueda de un modelo de corazón artificial permanente, y destinar estos fondos a las investigaciones so-

El autor

STEVE DITLEA se viene dedicando a la divulgación de los avances de la técnica desde 1978.



2. RECEPTORES DE ABIOCOR. Robert L. Tools (*arriba*), que aparece mostrando un corazón artificial como el implantado en su pecho, fue el primer paciente de AbioCor en julio de 2001. Murió en diciembre tras sufrir un grave accidente cerebrovascular. El segundo receptor, Tom Christerson (*abajo*), es, hasta la fecha, el que ha sobrevivido más tiempo con el AbioCor. Se le ve aquí con un fisioterapeuta en el Hospital Judío de Louisville, Kentucky.



JOHN LAIR *AFP/Corbis* (*arriba*); BRIAN BOHANNON (*abajo*)

bre modelos de bombas supletorias de la función ventricular. Lederman fue a Washington, junto con representantes de otros equipos de trabajo, para evitar este trasvase de la financiación. Al final, consiguieron convencer a un grupo de senadores de sus propios estados de que les ayudaran a mantener el apoyo financiero de los NIH, resucitando programas de investigación sobre el corazón artificial en dos universidades (Utah y estatal de Pennsylvania) y dos compañías (Nimbus en Rancho Cordova, California, y Abiomed). Hoy, Abiomed es la última compañía que queda de aquel grupo. La empresa ha recibido cerca de 20 millones de dólares de dinero federal. Su financiación gubernamental terminó en el año 2000, pero ese mismo curso Abiomed consiguió 96 millones de dólares por medio de una emisión de acciones.

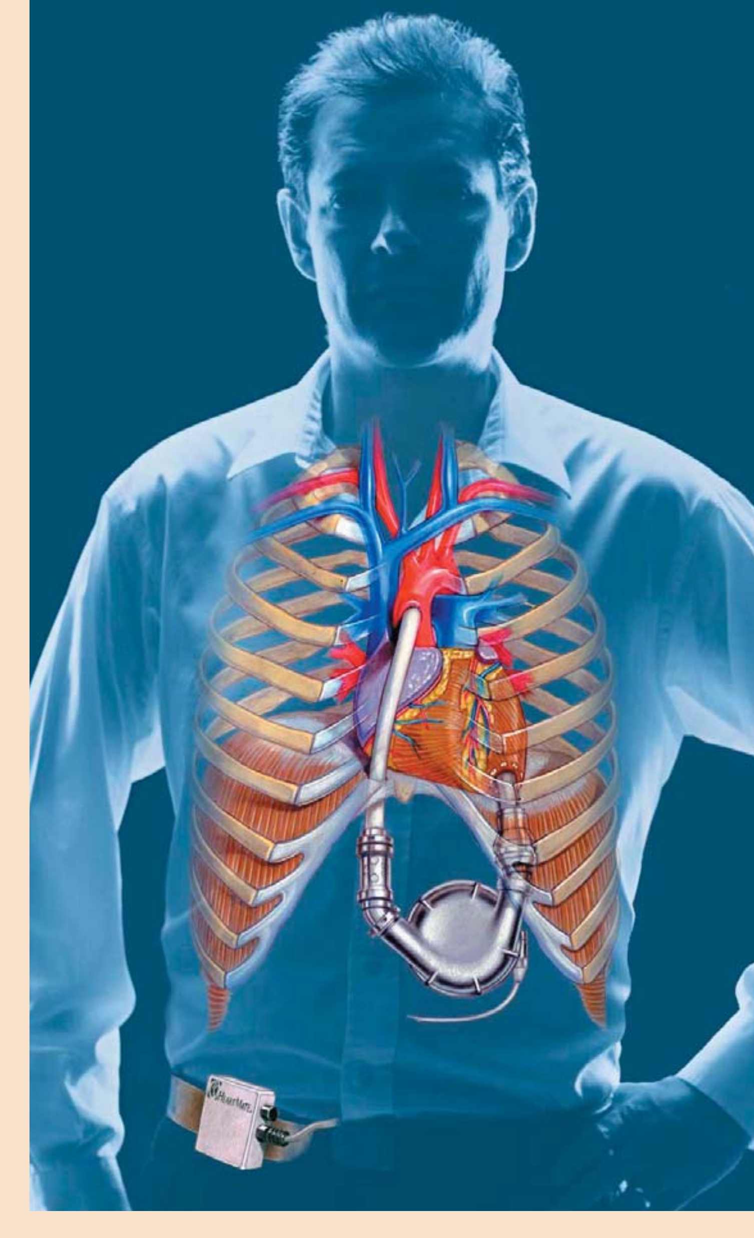
Lederman y sus colaboradores siguen empeñados en su idea de poner a punto una técnica médica, cuya época, según otros, ha pasado ya. En la sala de conferencias del cuartel general de Abiomed, situado en un parque de oficinas en el norte de Boston, Lederman atribuye su firme tenacidad a su equipo de investigadores: "Todos están convencidos de que hay posibilidades de éxito. Eso es muy importante. Es para mí un orgullo que nos tomemos nuestro trabajo tan seriamente." Resulta también evidente que para Lederman se trata, además, de un reto personal: en 1980 su padre murió súbitamente de un ataque cardíaco.

El diseño del AbioCor

A diferencia del Jarvik-7, el AbioCor no funciona mediante un compresor de aire. Oculto tras una banda central metálica, se encuentra el corazón de este corazón: un par de motores eléctricos que activan un sistema de bomba y válvula. Este mecanismo de bombeo propulsa hidráulicamente el fluido hacia delante y hacia atrás; provoca así que un par de membranas latan como las válvulas de un corazón humano.

Pero tal innovación constituye sólo el comienzo. Para funcionar en verdad como único contenedor del mecanismo, el dispositivo necesitaba un controlador pequeño, que, implantado, modificara el ritmo cardíaco de acuerdo con el nivel de actividad del paciente. El controlador desarrollado por Abiomed tiene el tamaño de un librito de bolsillo; implantado en el abdomen del paciente, se conecta por un cable con el corazón artificial. Los sensores situados dentro del corazón miden la presión de la sangre que rellena la cavidad derecha: la sangre que retorna al corazón desde el cuerpo; el controlador ajusta el ritmo cardíaco de acuerdo con esta presión. El ritmo cardíaco puede variar entre 80 y 150 latidos por minuto. Si los ensayos clínicos demuestran la idoneidad del sistema de control, podría reducirse su tamaño hasta convertirlo en un simple *microchip* que se incluiría en la unidad central del AbioCor.

La compañía Abiomed ha desarrollado también un sistema de conducción de la energía eléctrica para los motores del corazón artificial que no precisa de cables que atraviesen la piel del paciente, con lo que se evitan las infecciones. Una batería interna implantada en el abdomen del receptor puede contener bastante carga de energía como para mantener en funcionamiento el corazón durante 20 minutos. Esta batería se recarga continuamente a través de inducción electromagnética. (El mismo procedimiento utilizado en los cepillos de dientes eléctricos.) Bajo la piel del paciente se halla la batería interna, conectada por cable con una bobina de inducción que actúa como un conductor eléctrico pasivo. Otra bobina de inducción colocada por fuera



1. LA BOMBA HEARTMATE, el dispositivo de asistencia ventricular de más extensa aplicación, se implanta en el abdomen del paciente, como se muestra en esta representación artística. Colocada en el ventrículo izquierdo en fracaso funcional, bombea sangre oxigenada al cuerpo.

CORTESIA DE THORATEC

ASISTENCIA AL CORAZON

Los dispositivos de asistencia ventricular emergen como alternativas a la sustitución cardíaca

En el mes de noviembre de 2001, poco después de que comenzaran los ensayos clínicos con el AbioCor, un grupo de investigadores comunicó que otro ensayo clínico había demostrado los beneficios de un tratamiento, menos drástico, del fracaso cardíaco. Un dispositivo para la asistencia ventricular izquierda (LVAD, siglas de Left Ventricular Assisted Device) —una bomba implantada en el tórax o en el abdomen y aplicada al ventrículo izquierdo, la cavidad que bombea la sangre oxigenada al cuerpo— se ofrecía como un nuevo método terapéutico a corto plazo para los pacientes que estaban en lista de espera de un trasplante. El ensayo demostraba que los pacientes a los que se aplicaba el LVAD podían vivir dos años o más, por lo que se espera que el departamento de Administración de Alimentos y Fármacos autorice su uso a más largo plazo del previsto inicialmente.

El estudio evaluaba 68 pacientes con implantes del HeartMate, el modelo de LVAD más aplicado, y 61 pacientes que recibieron tratamiento médico, incluyendo potentes fármacos cardíacos. Transcurrido un año, más de la mitad de los sometidos a LVAD seguían con vida, mientras que lo hacían sólo una cuarta parte de los que recibían tratamiento médico. A los dos años, el porcentaje de supervivencia era del 23 % en el grupo del LVAD y del 8 % en el grupo médico. El superviviente de mayor duración en el grupo del LVAD alcanza ahora los tres años; el superviviente de mayor duración del grupo médico murió a los 798 días. "Todavía viven 21 pacientes que llevan estos dispositivos", asegura Eric Rose, cirujano jefe del Hospital Presbiteriano de Columbia en Nueva York e investigador principal de este ensayo clínico. "Los resultados de este modelo son un punto de referencia para comparar otras alternativas terapéuticas."

El modelo HeartMate, fabricado por Thoracec, en Pleasanton, California, está lejos de la perfección. Muchos de los individuos en los que se implantaron sufrieron graves infecciones durante el test, ya que el dispositivo se conectaba con una batería externa a través de un tubo que perfora la piel. Otros pacientes con HeartMate fallecieron por disfunciones mecánicas, como el fallo de su motor. Pero Thoracec ha refinado en la nueva versión el dispositivo y está desarrollando una segunda y tercera generación, diseñadas para durar ocho y 15 años, respectivamente.



2. JARVIK 2000 es el único dispositivo de asistencia ventricular cuyo pequeño tamaño permite su implantación en el ventrículo izquierdo. Robert K. Jarvik, inventor del corazón artificial Jarvik-7, ha optado ahora por los dispositivos de asistencia ventricular, dejando de lado los órganos de sustitución.

CORTESIA DEL INSTITUTO CARDIACO DE TEXAS

Otro LVAD, llamado LionHeart, fabricado por Arrow International en Reading, Pennsylvania, es un sistema totalmente implantable sin conexiones que atraviesen la piel. En los ensayos clínicos, el LionHeart utiliza una bobina de inducción como el AbioCor, para transmitir la energía eléctrica a través de la piel. El MicroMed DeBakey VAD es también totalmente implantable, si bien, a diferencia del corazón natural propulsa la sangre en un flujo continuo y no lo bombea de forma pulsátil. Para los proponentes de esta técnica, continuidad significa eficiencia y seguridad; los críticos oponen que el latido pulsátil es necesario para mantener despejados los vasos sanguíneos. El pionero de la cirugía cardíaca Michael E. DeBakey, que realizó la primera derivación coronaria (*by-pass*) con éxito en 1964, desarrolló este dispositivo en colaboración con uno de sus pacientes, David Saucier, un ingeniero de la NASA a quien se le había practicado un trasplante cardíaco.

Robert K. Jarvik, inventor del Jarvik-7, y ahora presidente de la compañía Jarvik Heart, ha introducido el Jarvik 2000, el único LVAD lo suficientemente pequeño como para alojarse en el interior del ventrículo izquierdo. Lo mismo que el DeBakey VAD, el modelo Jarvik 2000 bombea la sangre de forma continua. El dispositivo se encuentra en fase de ensayo para su aplicación como tratamiento "puente" antes de un trasplante cardíaco; ha sido implantado en algunos pacientes para su utilización a largo plazo. Jarvik cree que su dispositivo puede ayudar a corazones sin gravedad extrema a repararse por sí mismos, quizás en combinación con tratamientos mediante células madre. Otra potencial terapia combinada puede ser el uso del LVAD con el esteroide clenbuterol que refuerza el corazón, según un ensayo publicado el último año. Magdi Yacoub, del Hospital Harefield, en Londres, administró clenbuterol a 17 pacientes que portaban implantado un LVAD. En cinco de los pacientes los corazones recobraron la suficiente fuerza como para permitir retirar dicho dispositivo.

—S.D.

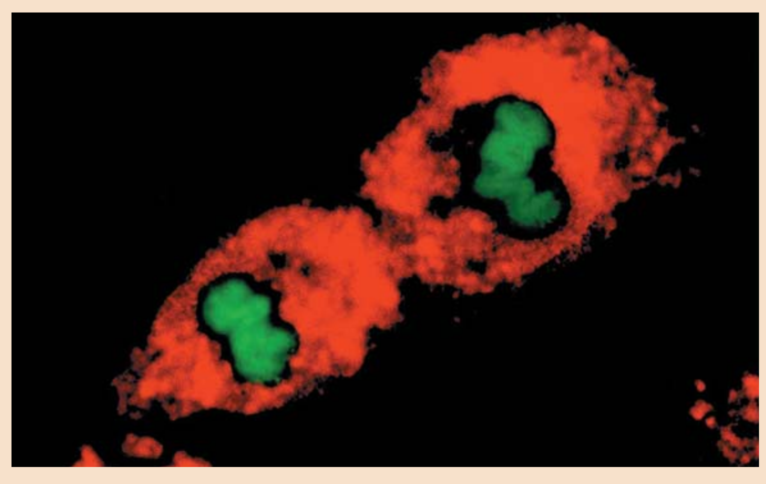
de la piel del sujeto, conectada con una batería externa, transmite la energía a través de la piel, con mínima radiación y calor. El paciente puede llevar la batería externa colocada sobre un cinturón, junto con un monitor independiente que le avisa si la carga de la batería se encuentra baja.

En el diseño del AbioCor importaba sobremanera que la máquina bombeara la sangre sin formar coágulos. Cuando Lederman trabajaba para Avco, dedicó cuatro años a investigar la interacción entre la sangre y los materiales sintéticos; abordó entonces los grados de reacción ante varios procesos de la coagulación. En esencia, el AbioCor minimiza la coagulación, asegurándose de que las células sanguíneas no tengan tiempo suficiente para adherirse unas a otras. La sangre fluye suave a través del corazón artificial, sin que

AUTORREPARACION CARDIACA

Las células madre pueden ser la mejor medicina para los corazones con lesiones

De vez en cuando, hallazgos inesperados revolucionan totalmente los conocimientos científicos tenidos como paradigmáticos. Dos estudios publicados recientemente en *The New England Journal of Medicine* han refutado la vieja tesis que sostenía que el corazón humano no puede autorrepararse después de haber sufrido un infarto u otro tipo de lesión. Sus autores han llegado a la conclusión de que en los corazones adultos pueden crecer nuevas fibras musculares, originadas, quizá, por células madre, las células indiferenciadas a partir de las cuales se construye todo el cuerpo. El descubrimiento puede abrir la puerta a terapéuticas que estimulen la reparación natural del corazón.



LA IMAGEN DE MICROSCOPIO muestra la mitosis de una célula del músculo cardíaco, o miocito, obtenida de un paciente fallecido poco después de sufrir un ataque cardíaco. Lo que demuestra que, contra la opinión médica establecida, se forman nuevo miocitos en sustitución de los dañados.

Han sido equipos de investigadores de la Escuela de Medicina de Nueva York (NYMC) en Valhalla y de la Universidad de Udine los que han llevado a cabo estos experimentos iconoclastas. El primer estudio encontró marcadores químicos que indicaban que se había producido el crecimiento de nuevas fibras musculares lisas en muestras de tejido cardíaco extraídas de pacientes que habían fallecido entre 4 y 12 días después de haber sufrido un infarto de miocardio. El segundo estudio, en el que se realizó el examen *postmortem* de corazones de donantes femeninos trasplantados a receptores masculinos, mostraba la presencia de células madre con cromosomas Y (cromosoma masculino) en los corazones donados. Aunque estas células madre podrían haber emigrado desde la médula ósea del receptor masculino, también podrían haberse originado en el remanente cardíaco al cual se había suturado el corazón femenino.

"Nuestro trabajo sugiere la posibilidad de que existan células madre cardíacas", dice Piero Anversa, director del Instituto de Investigación Cardiovascular del NYMC. "Necesitamos determinar todas las características que prueben que, en realidad, lo que tenemos entre manos es la célula primitiva del corazón. Y entonces tendremos que comprobar si es posible introducir a estas células madre en las áreas lesionadas del corazón con el fin promover su curación."

Otros investigadores están buscando métodos reparativos para las lesiones cardíacas a partir de células madre aisladas de otras partes del cuerpo. Philippe Menasché, profesor de cirugía cardiovascular del Hospital Bichat-Claude Bernard de París, ha inyectado células madre procedentes de músculos esqueléticos de las piernas de los pacientes en las áreas lesionadas de su corazón, durante intervenciones de derivación coronaria (*by-pass*). Los resultados iniciales de los ensayos clínicos han sido alentadores, demostrándose el engrosamiento de las paredes miocárdicas con tejido funcional. Pero Menasché se muestra cauteloso sobre estos resultados terapéuticos. "Como mucho, estas células pueden potenciar favorablemente otros tratamientos", matiza. "Imaginar que algún día podríamos regenerar completamente un corazón infartado no es una postura realista."

Pero algunas firmas dedicadas a la biotecnología mantienen expectativas aún mayores. La compañía Advanced Cell Technology ha transformado células madre en células cardíacas contráctiles; se propone crear parches trasplantables para reparar amplias áreas lesionadas del corazón. "Estamos tratando de construir un corazón completo", dice Robert Lanza, el vicepresidente para el desarrollo científico y médico. Esta tarea requiere generar músculo cardíaco y tejido vascular, así como fabricar un material biológico soluble que sirva como estructura transitoria de soporte durante la construcción del corazón. ¿Cuál sería el plazo para producir un corazón artificial biológico? Según Lanza, "se podría producir un corazón que funcionara en 10 años y junto con los ensayos clínicos se llegaría a los 15 años".

—*S.D.*

existan áreas donde pueda remansarse. Todas las superficies que se hallan en contacto con la sangre están fabricadas con angioflex, un plástico de poliuretano biológicamente inerte. Las superficies de contacto son también de una lisura extrema, pues en las superficies irregulares pueden formarse coágulos. "Teníamos que construir un sistema inconsútil", señala Lederman.

Ensayo y error

Después de probar su modelo de corazón artificial en terneros y cerdos, Abiomed obtuvo en enero del año 2001 el permiso de la FDA para iniciar los ensayos clínicos en humanos. La FDA valoraría el éxito de los ensayos analizando los porcentajes de supervivencia y la calidad de vida de los pacientes, evaluados mediante pruebas estándar. Tan sólo los enfermos

descartados para un programa de trasplante cardíaco podrían ser aceptados como voluntarios para la implantación. El tamaño del AbioCor excluía también a determinados pacientes: el dispositivo puede incluirse en la cavidad torácica de tan sólo la mitad de los adultos varones y del 18 % de las mujeres. (Abiomed está desarrollando un modelo de segunda generación, menor, que podría implantarse en la mayoría de los varones y de las mujeres.) En cada procedimiento quirúrgico de implantación de un corazón artificial la compañía Abiomed corrió con los gastos del dispositivo y de todos los mecanismos de soporte. Los hospitales y los médicos que participan en los ensayos ofrecen sin cargos instalaciones y asistencia. El coste total de cada implantación y del consiguiente tratamiento supera el millón de dólares.

El 2 de julio de 2001 se implantó el primer AbioCor. Lo recibió Robert L. Tools en el Hospital Judío de Louisville, Kentucky. Los cirujanos Laman A. Gray y Robert D. Dowling tardaron siete horas en realizar la operación. Tools padecía diabetes, insuficiencia renal e insuficiencia cardíaca congestiva. Antes de la implantación del AbioCor difícilmente podía levantar su cabeza. Después de la operación, Tools sufrió una hemorragia interna y problemas pulmonares, aunque al cabo de dos meses su función renal se recuperó y tenía bastante fuerza como para hacer breves salidas del hospital. Sus médicos confiaban en que Tools podría volver a casa por Navidad. Sin embargo, las complicaciones hemorrágicas persistieron, lo que dificultaba la administración de anticoagulantes para prevenir la formación de trombos. El 11 de noviembre sufrió un grave accidente vascular cerebral que le provocó una hemiplejía derecha. Falleció a los 19 días, a causa de las complicaciones consiguientes a una hemorragia gastrointestinal.

El segundo receptor de un AbioCor —un hombre de negocios retirado de 71 años, llamado Tom Christerson— ha evolucionado bastante mejor. Los cirujanos del Hospital Judío le implantaron el dispositivo el 13 de septiembre de 2001. Después de una buena recuperación, abandonó el hospital en marzo para fijar su residencia en un hotel cercano, donde él y su familia pudieran aprender a cuidar su corazón artificial por sí mismos. Al mes siguiente regresó a su casa en Central City, Kentucky. En las siguientes semanas, Christerson continuó con la fisioterapia prescrita y acudía a la revisión semanal en el Hospital Judío. Su automóvil fue preparado de modo que dispusiera de una batería para su corazón artificial.

En el Instituto de Cardiología de Texas, O. H. “Bud” Frazier —el cirujano que posee el récord de trasplantes cardíacos— implantó el AbioCor en dos pacientes. Uno vivió con el dispositivo más de cuatro meses; falleció por complicaciones derivadas de un accidente vascular cerebral. El otro murió en el mismo día de la implantación por hemorragia incontrolada después de pasar 20 horas sobre la mesa de operaciones. Se han realizado también implantaciones en el hospital clínico de la Universidad de California en Los Angeles y en el de la Universidad Hahnemann de Filadelfia. El paciente de Los Angeles vivió algo menos de dos



AFB/CORBIS

3. INMEDIATAMENTE ANTES DE IMPLANTAR a Tom Christerson el AbioCor, los cirujanos Laman A. Gray, Jr. (*izquierda*) y Robert D. Dowling (*derecha*) extraen el aire del corazón artificial para prevenir coágulos de sangre. El procedimiento fue ensayado el 13 de septiembre de 2001 en el Hospital Judío de Louisville.

meses, antes de que le fuera retirada la asistencia cardíaca debido a un fracaso multiorgánico. El enfermo de Filadelfia, James Quinn, de 51 años, recibió el AbioCor el 5 de noviembre de 2001. Aunque sufrió una accidente vascular cerebral leve en el mes de diciembre, fue dado de alta al mes siguiente para pasar a residir en un hotel cercano. Sin embargo, el pasado mes de febrero ingresó de nuevo en el hospital con dificultades respiratorias. Los médicos le trataron por una neumonía que puso en peligro su vida, ya que sus pulmones se encontraban muy debilitados por un enfisema crónico e hipertensión pulmonar. A Quinn se le aplicó respiración asistida, pero su recuperación fue muy lenta. No obstante, a mediados de mayo su estado mejoró y los médicos iniciaron la retirada paulatina del ventilador.

En enero, Abiomed comunicó en una conferencia de prensa los resultados preliminares de los ensayos clínicos en marcha. Lederman hizo notar que el corazón artificial había continuado funcionando en pacientes en los que fue implantado bajo condiciones que podían haber lesionado o destruido un corazón natural, como, por ejemplo, una grave deficiencia de oxígeno en la sangre y una fiebre de más de 41 ºC. Tam-

bién subrayó que ningún paciente había sufrido una infección relacionada con el dispositivo. Pero Abiomed reconoció un fallo de diseño en las conexiones del corazón artificial con el cuerpo del paciente. El AbioCor se conecta con un remanente de las aurículas del extirpado corazón del paciente. Las autopsias practicadas a dos pacientes habían puesto de manifiesto coágulos en las estructuras de plástico del tamaño de un dedal, con un diseño parecido al enrejado de una "jaula", cuya finalidad es mantener separadas las paredes remanentes de las aurículas. Debido a que estos coágulos pueden provocar accidentes cerebrovasculares, Abiomed dejará de utilizar este enrejado de plástico cuando implante el AbioCor; en opinión de la compañía, estas estructuras han sido necesarias en los ensayos del corazón artificial en terneros, pero no lo son en humanos.

A principios de abril, Abiomed anunció que no estaba en condiciones de cumplir su calendario original, que incluía la implantación del AbioCor en 15 voluntarios para finales de junio. La compañía aseguró que deseaba revisar con más detalle lo sucedido en sus seis primeros casos. Sin embargo, poco más de una semana después de este anuncio, cirujanos del Hospital Judío de Louisville realizaron otra implantación, la primera con un AbioCor sin el enrejado de plástico en las aurículas. El corazón artificial funcionó bien, pero el paciente, de 61 años, falleció pocas horas después de la operación a causa de una embolia pulmonar. Según Laman Gray, el cirujano que realizó la implantación junto con su colega Robert Dowling, el trombo no se originó en el AbioCor.

Los cirujanos que han trabajado con el AbioCor siguen convencidos de las posibilidades de este modelo de corazón artificial, a pesar de los recientes fracasos. Frazier, del Instituto de Cardiología de Texas, cree que la formación de coágulos en el enrejado de plástico del AbioCor colocado en las aurículas es una complicación imprevisible, que, por fortuna, puede corregirse. Gray participa de esa opinión: "Está muy bien diseñado y no es trombogénico. El problema reside en la zona de entrada de sangre. Estoy verdaderamente sorprendido de lo bien que ha funcionado el AbioCor en los ensayos clínicos iniciales." (Ambos cirujanos han actuado como consultores en el diseño del AbioCor y son responsables de la mayoría de las pruebas realizadas en animales.)

Pero no todo el mundo se muestra tan entusiasta. "La sustitución total del corazón por dispositivos mecánicos plantea una serie de interrogantes que no han aflorado dado el exiguo número de pacientes implantados", objeta Claude Lenfant, director del Instituto Nacional del Corazón, Pulmón y Sangre. ¿Qué calidad de vida puede esperar un receptor con una sustitución total de su corazón con el AbioCor? ¿Cuáles serán los beneficios clínicos? ¿Es el coste económico aceptable para la sociedad? Y por si fuera poco, el mismo Robert K. Jarvik, que desarrolló el corazón artificial Jarvik-7, afirma ahora que un corazón artificial permanente encierra excesivos riesgos. "Extirpar el corazón no es prácticamente nunca una buena idea", proclama. "En el año 1982 no se sabía, se justifica, que un corazón podía mejorar mucho su función si recibe apoyo en ciertas enfermedades muy frecuentes. Esta es la razón por la que yo sólo extirpo el corazón en situaciones muy extremas."

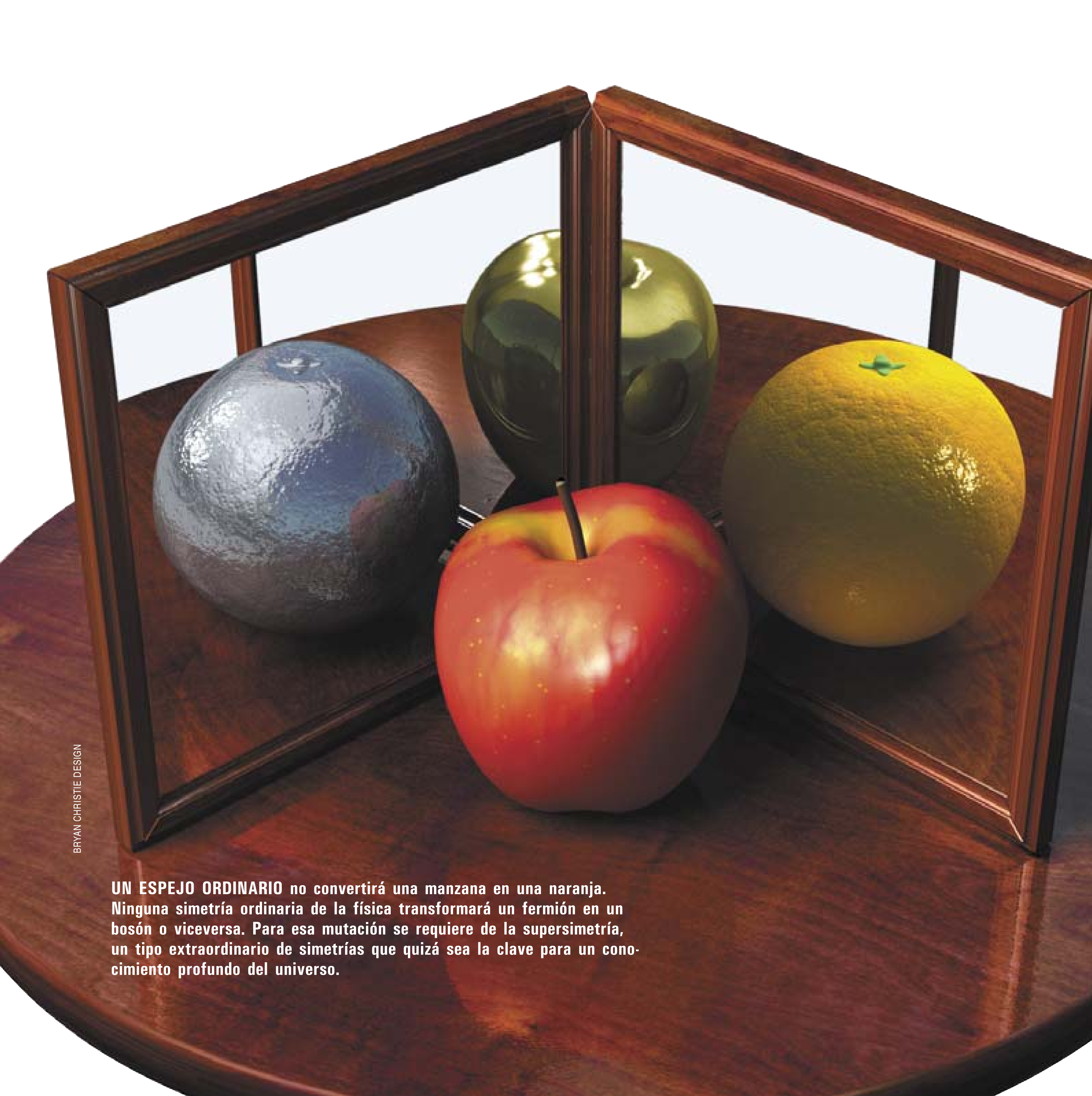
El meollo de la cuestión

Mientras los ensayos con el AbioCor continúan su curso, importa, sobre todo, reducir la incidencia de accidentes cerebrovasculares. Los médicos habían confiado en controlar este riesgo mediante la administración de anticoagulantes a dosis bajas, pero algunos de los pacientes en los que se implantó un AbioCor se encontraban tan enfermos, que no podían tolerar ni siquiera esas dosis mínimas. Dado que estos pacientes presentaban enfermedades susceptibles de desarrollar hemorragias internas, la determinación de la dosis más apropiada de anticoagulantes se basó en un delicado equilibrio: una dosis excesiva podía provocar la muerte por hemorragia, mientras que una dosis demasiado baja podía propiciar un accidente cerebrovascular.

A pesar de que habrá que mejorar los aspectos técnicos, Lederman se manifiesta satisfecho de los resultados clínicos obtenidos. El objetivo inicial de los ensayos era demostrar que el AbioCor puede mantener vivo a un paciente al menos durante 60 días; cuatro han sobrepasado esa cota. "Si la mayoría de los próximos pacientes, afirma Lederman, siguen los pasos de los primeros, pero sin complicaciones inaceptables como son los accidentes cerebrovasculares, nuestro plan es solicitar de la FDA la autorización para la aplicación clínica del sistema en pacientes que se encuentren en el umbral de la muerte. A los pacientes con menos de 30 días de expectativa de vida podemos ofrecerles la posibilidad de vivir muchos meses con una vida de calidad." Pero algunos especialistas en ética médica cuestionan este planteamiento, ya que, según ellos, un individuo a las puertas de la muerte puede dar su consentimiento a cualquier procedimiento, sin tener en cuenta sus consecuencias.

Y por último queda el problema de definir qué se entiende por una aceptable calidad de vida. En el año 1981 Jarvik escribió que, en lo concerniente al corazón artificial, se trataba de conseguir "que se olvidara", es decir, que se viviera sin pensar en su implantación [*véase* "El corazón artificial", por Robert K. Jarvik, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1981]. ¿Ha cumplido el AbioCor esta exigencia? Carol, la esposa de Tools, afirma que su marido era consciente de que los latidos de su viejo corazón habían sido sustituidos por la continua y sorda vibración del AbioCor. "Algunas veces, estando acostado, lo oía —dice Carol—, pero otras veces podía olvidarlo... [El] siempre sabía que estaba allí, porque tenía la batería eléctrica para recordárselo. Desde luego, no es nada parecido a la sustitución de una cadera." A pesar de todo, ella cree que su calidad de vida durante los últimos meses fue buena. "Tuvo la oportunidad de vivir bastante bien, aunque desafortunadamente mucho menos tiempo del que hubiera deseado." Y rubrica: "Nunca se arrepintió de haberlo consentido".

Descubrir la



BRYAN CHRISTIE DESIGN

UN ESPEJO ORDINARIO no convertirá una manzana en una naranja. Ninguna simetría ordinaria de la física transformará un fermión en un bosón o viceversa. Para esa mutación se requiere de la supersimetría, un tipo extraordinario de simetrías que quizá sea la clave para un conocimiento profundo del universo.

supersimetría

Un fenómeno esquivo y extraño, la supersimetría, concebida para la física de las partículas elementales, se ha manifestado en los núcleos de platino y de oro

Jan Jolie

La supersimetría transforma las partículas que constituyen el mundo material, los fermiones, clase a la que pertenecen protones, neutrones y electrones, en bosones, las partículas que generan las fuerzas de la naturaleza, y viceversa. Por naturaleza, los fermiones rehúyen a sus iguales. Obedecen al principio de exclusión de Pauli: dos no podrán nunca ocupar el mismo estado cuántico. La intensidad de esta aversión a la compañía impide el desplome sobre sí misma de una estrella de neutrones, aunque su peso haya superado ya a las demás fuerzas de la naturaleza. Los bosones, en cambio, tienden a agruparse en estados idénticos. Cada bosón en un estado determinado anima a otros de su especie a emularlo. Bajo las condiciones apropiadas, formarán regimientos de clones, como los fotones de un haz láser o los átomos del helio 4 superfluido.

En el espejo de la supersimetría, los huraños fermiones parecen sociables bosones, los sociables bosones, huraños fermiones. Las simetrías ordinarias de la física carecen de semejante poder. Actúan como los espejos distorsionantes del callejón del Gato: de un electrón corriente harán un fantasmagórico neutrino; pero no cambiarán a los fermiones en bosones ni a los bosones en fermiones.

Las supersimetrías se estudian intensamente desde que se las enunciara en el decenio de los setenta. Muchos creen que guardan la clave del próximo gran paso en nuestro conocimiento de las partículas y de las fuerzas fundamentales. Sin embargo, la busca, en los colisionadores de mayor energía, de las partículas predichas por la supersimetría no ha dado resultado por el momento.

En los años ochenta, los especialistas en física nuclear apuntaron que no sólo en las colisiones violentas se podría llegar a ver la supersimetría. Predijeron que en ciertos núcleos atómicos ésta existía en una forma diferente, que mezcla también objetos muy distintos entre sí: núcleos con un número par de protones y neutrones con núcleos con un número impar. (Se trata de nuevo de fermiones y bosones: una partícula compuesta por un número impar de fermiones es un fermión; con un número par, un bosón.)

Para entender mejor la supersimetría nuclear, imaginemos un salón de baile. Si danza un número par de bailarines, cada uno tendrá su compañero: un baile de parejas. Pero si el número es impar, quedará una persona suelta en la pista. En el espejo supersimétrico, ese elemento sobrante aparece como una pareja más, guardando el paso de las otras. De manera similar, el núcleo con un número impar de protones y neutrones, o de nucleones —esta denominación abarca tanto a protones como a neutrones—, se pone en relación con uno que tiene todos los nucleones apareados.

Recientemente, se ha observado una versión de esta extraordinaria simetría en isótopos de oro y de platino, con los protones y neutrones a modo de dos grupos distintos de bailarines, como los participantes de dos concursos de baile que se celebrasen en el mismo salón. En esta supersimetría nuclear se ligan cuatro casos, no dos: que en cada concurso haya un participante sin pareja de baile (números impares de protones y de neutrones), que sólo lo haya en uno de los dos concursos (un número par de protones y un número impar de neutrones, o viceversa) y que en ambos concursos se encuentren todos apareados (números pares de protones y de neutrones.)

El núcleo atómico es un sistema cuántico cargado de secretos. Su estudio a lo largo de los decenios ha dado lugar una y otra vez a inesperadas observaciones. Los teóricos recurren a muchos instrumentos para entender cada faceta de la muy complicada física de los núcleos. El nuevo resultado añade la supersimetría al instrumental y muestra que no se trata sólo de una curiosidad matemática, sino que existe en el universo.

Las investigaciones de la física nuclear también proporcionan las herramientas necesarias para comprender otros sistemas cuánticos que tienen características generales similares a las de los núcleos; los “sistemas finitos de muchos cuerpos”,

así se les llama, constan de unas pocas partículas o de centenares. Hoy, los métodos experimentales permiten el estudio de objetos de esa naturaleza formados por un número reducido de átomos o moléculas. La supersimetría quizás incida también en esos campos de la física.

Núcleos misteriosos

Toda sustancia del mundo que nos rodea está formada por átomos, por nubes de electrones que giran en torno a pequeños y pesados núcleos atómicos. Se conoce muy bien cómo se distribuyen los electrones y cómo las propiedades que gobiernan nuestro mundo material nacen de tales estructuras. Algunas de las predicciones más precisas de la ciencia se refieren a detalles muy finos de los niveles de energía de los electrones de los átomos. Los núcleos atómicos, en cambio, siguen siendo mucho más inescrutables.

La razón fundamental de esta disparidad se encuentra en la naturaleza de las fuerzas que intervienen. Los electrones se mantienen en sus orbitales en torno a los átomos por la fuerza electromagnética, unas cien veces menos intensa que la que domina dentro de los núcleos (de aquí el nombre de ésta: la fuerza, o interacción, nuclear fuerte). Las técnicas teóricas que sirven para las fuerzas débiles como el electromagnetismo fallan con una tan intensa como la nuclear. Además, los electrones son partículas elementales sin estructura; los protones y neutrones constituyen complejos paquetes de otras partículas (quarks y gluones). La fuerza entre los nucleones no es directamente una fuerza fundamental, como el electromagnetismo, cuyas ecuaciones conocemos con exactitud, sino el complicado resultado de las interacciones de los quarks y gluones que los constituyen.

La interacción nuclear atrae con fuerza a unos pocos femtómetros (10^{-15} metros); más allá cae a cero. Empaqueta los nucleones; cada nucleón experimenta una interacción fuerte con los que haya dentro de su alcance. (Los orbitales de los electrones están unas 10.000 veces más lejos.) La estructura que resulta es uno de los sistemas cuánticos más interesantes que se conocen. Durante docenas de años, se han elaborado muchos modelos teóricos para describirla (*véase el recuadro* "Modelos nucleares"). Algunos comparan los núcleos a gotitas de fluido cuántico que vibran y oscilan de maneras específicas. Otros copian la estructura que tan bien funciona para los electrones atómicos: un sistema de capas de orbitales discretos que los nucleones llenan empezando por el nivel más bajo de energía.

Los diferentes modelos tienden a funcionar mejor para determinadas clases de núcleos, dependiendo de cuántos nucleones tengan y de cuán ocupadas estén las capas externas. Dado que los protones tienden a emparejarse entre sí, y que los neutrones hacen lo propio, entre los factores determinantes del comportamiento de un núcleo cuenta el que sea par o impar el número de sus protones y de sus neutrones (*véase el recuadro* "Medida e identificación de los estados nucleares"). Los núcleos par-par tienden a ser los más simples, seguidos por los par-impar; los más difíciles son los impar-impar.

La simetría es un importante y potente instrumento para la confección y utilización de estos modelos. Los principios de simetría aparecen por toda la física, a menudo de maneras que no se esperarían. Por ejemplo, la ley de conservación de la energía puede deducirse a partir de un principio de simetría relacionado con el transcurso del tiempo. Las capas de los orbitales, tanto las de los electrones como las de los nucleones, se distinguen por propiedades relacionadas con simetrías, así el momento angular de las partículas en el orbital y su cambio o invariabilidad bajo una reflexión (a esta segunda propiedad se la llama paridad). Las ecuaciones que gobiernan la física de las partículas elementales se basan en simetrías.

Una de las consecuencias más importantes de la simetría en la física cuántica es el principio de exclusión de Pauli y la correspondiente división de las partículas en bosones y fermiones.

El helio 4 nos sirve de ejemplo de partícula compuesta bosónica.

El autor

JAN JOLIE se doctoró en física teórica por la Universidad de Gante en 1986. Tras cinco años en el Instituto Laue-Langevin de Grenoble, pasó a interesarse por el trabajo experimental en 1992, año en que aceptó un puesto en la Universidad suiza de Friburgo. Además de los experimentos que se describen en este artículo, ha trabajado en aplicaciones menos abstractas, como la tomografía de rayos gamma y de neutrones y la construcción de fuentes de rayos gamma sintonizables. Dirige el Instituto de Física Nuclear de la Universidad de Colonia. Ha recibido el premio Leigh Page de la Universidad de Yale por su trabajo sobre las simetrías y supersimetrías dinámicas de los núcleos atómicos.

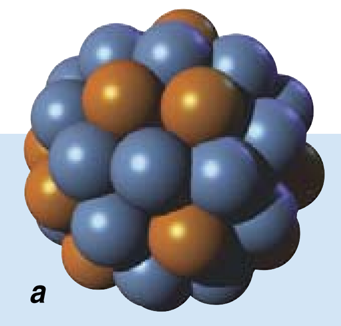
Resumen/*Los nucleones*

En física cuántica, todas las partículas y campos se dividen en dos tipos muy distintos: fermiones y bosones. Fermiones son los electrones, los protones y los neutrones que forman la materia. Los bosones incluyen a los fotones (responsables del electromagnetismo) y a los gluones (que mantienen unidos a los quarks).

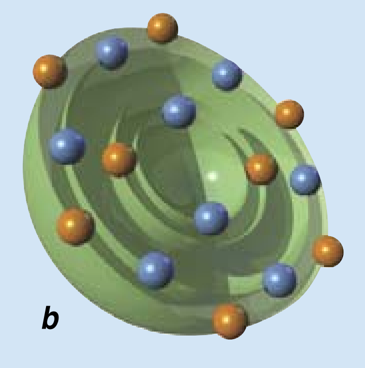
Las simetrías desempeñan un papel importante en cada rama de la física. Todas las simetrías ordinarias respetan la distinción entre bosones y fermiones. Las teorías supersimétricas incorporan potentes propiedades matemáticas que intercambian bosones y fermiones. No se ha detectado aún experimentalmente la supersimetría de las partículas elementales.

En los núcleos atómicos, lo mismo los protones que los neutrones forman pares que se comportan como bosones compuestos. Hay, pues, cuatro clases de núcleos (par-par, par-impar, impar-par e impar-impar), según estén apareados o no todos los protones y todos los neutrones. Una variante de la supersimetría liga cuatro núcleos de estos tipos en un "cuadrado mágico". Se acaba de obtener la confirmación experimental de dicha predicción.

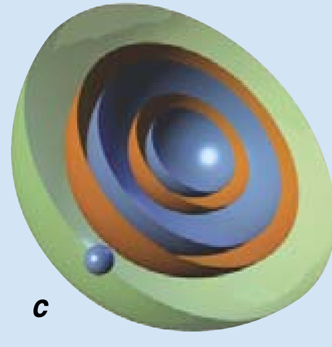
Modelos nucleares



a



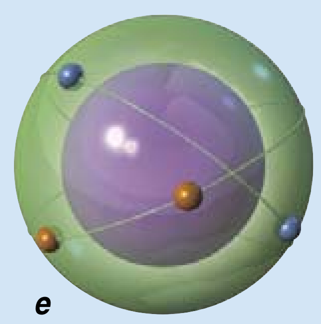
b



c



d



e

Los núcleos (*a*), cien billones (10^{14}) de veces más densos que el agua, son paquetes muy compactos de protones (*naranja*) y neutrones (*azul*). Debido a la intensidad y complejidad de la interacción nuclear fuerte que los mantiene unidos, ha habido que recurrir a modelos aproximados para describir sus estados cuánticos.

El modelo de capas (*b*) recuerda la descripción de los electrones en los átomos. Considera el núcleo atómico un conjunto de neutrones y protones (nucleones) que interaccionan débilmente en un pozo de energía potencial. Los nucleones pueden ocupar varias órbitas, análogas a las de los electrones de la periferia de un átomo, pero ahora con dos conjuntos de órbitas —uno para protones, uno para neutrones—. Igual que los electrones, los nucleones son partículas fermiónicas; el principio de exclusión se les aplica, de manera que dos no pueden ocupar la misma órbita. Las órbitas forman capas, o grupos de órbitas que tienen energías parecidas, con grandes separaciones energéticas entre ellas. Los núcleos con una capa cerrada (llena) de protones o una capa cerrada de neutrones, y sobre todo los que tienen una y otra, muestran una gran estabilidad, similar a la de los átomos de los gases nobles, con sus capas de electrones completas.

En el caso de núcleos con unos pocos nucleones sobrantes más allá de una capa cerrada (*c*), se puede despreciar hasta cierto punto los nucleones individuales de la capa cerrada y concentrarse en los pocos que quedan fuera de ella. Las interacciones entre esos nucleones más externos sí deben tenerse en cuenta. En núcleos pesados con muchos nucleones fuera de la última capa cerrada, la complejidad de los cálculos se torna inabordable, incluso con los ordenadores más rápidos.

El modelo colectivo, o de la gota líquida (*d*), se aplica a los núcleos pesados, formados por unos cien o más nucleones. El modelo no sigue el movimiento de los nucleones individuales; compara el núcleo a una gotita de un líquido cuántico que sufre diversas vibraciones y rotaciones. Las propiedades del núcleo se encierran en la densidad y la tensión superficial del líquido o en la carga eléctrica distribuida por él. Este modelo ofrece una explicación rigurosa de ciertas clases de núcleos alejados de los de capas cerradas (es decir, con un gran número de nucleones en la capa externa).

En física cuántica, una excitación de una gotita (pensemos en una vibración) toma muchas de las propiedades características de una partícula; puede comportarse como fermión o bosón. Cuando el modelo colectivo se aplica a los sistemas más sencillos —los núcleos par-par, que tienen un número par tanto de protones como de neutrones—, los constituyentes básicos del modelo —las vibraciones superficiales— actúan como bosones. Cuando el número de nucleones es impar, el último nucleón ocupa una órbita que depende del estado de la gotita; las excitaciones son fermiones.

A través del emparejamiento inducido por la fuerza nuclear, el modelo de los bosones interactivos (*e*) conecta el modelo de capas y el modelo de la gota líquida. El modelo analiza los núcleos par-par pesados como colecciones de pares de nucleones situados fuera de una capa cerrada; viene a ser como describir un baile mediante las parejas que bailan, no mediante los individuos que las componen. Cuando dos nucleones se emparejan, parecen un bosón, pero hay diferentes tipos de pares. En la analogía del baile, algunas parejas danzan un vals lento mientras otras barren la pista con una rápida polca.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

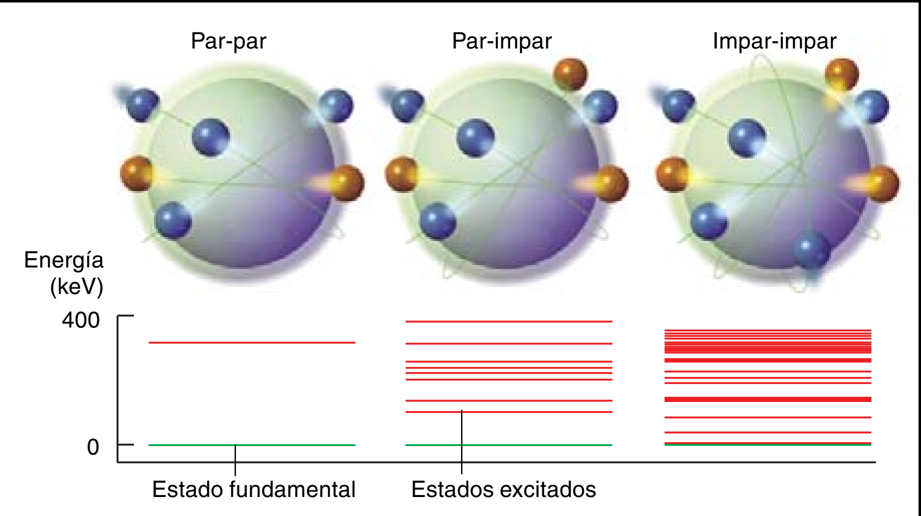
Lo forman seis fermiones (dos protones, dos neutrones y dos electrones). Los nucleones, a su vez, son fermiones compuestos por tres fermiones fundamentales (quarks). De acuerdo con la regla general, un número par de fermiones forma un bosón compuesto, en tanto que un número impar constituye un fermión compuesto. Al convertir bosones en fermiones, y viceversa, la supersimetría abre una nueva clase de posibles relaciones entre las partículas. Las nuevas matemáticas de estas relaciones dan lugar a un poder computacional mucho mayor a la hora de analizar o predecir el comportamiento de un sistema.

Simetrías nucleares

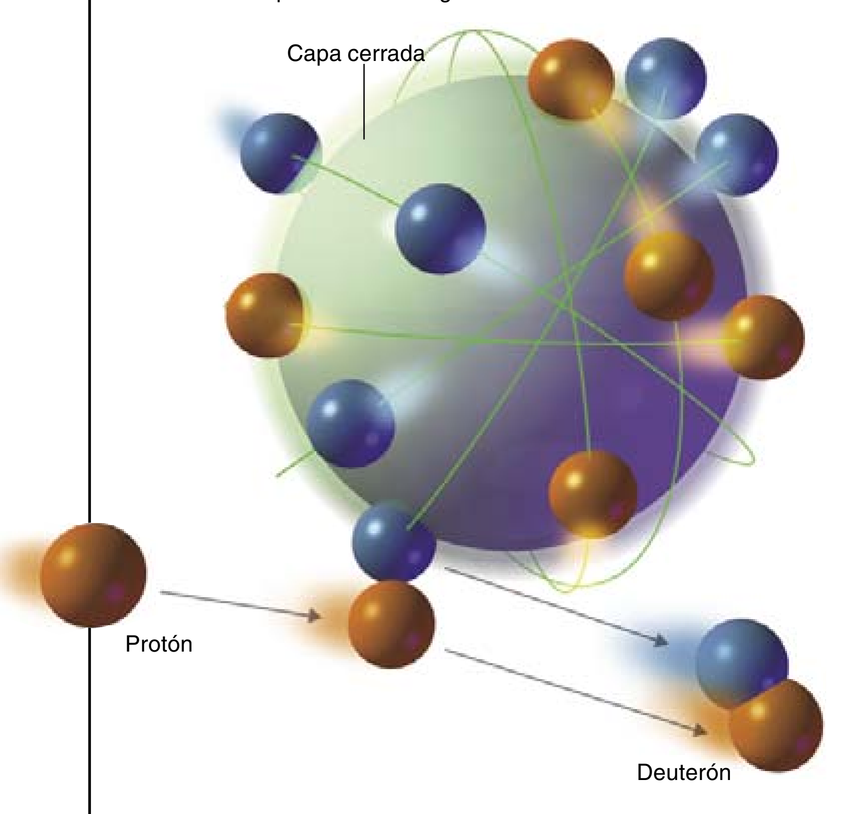
La simetría desempeña una función clave en el modelo nuclear de los bosones interactivos.

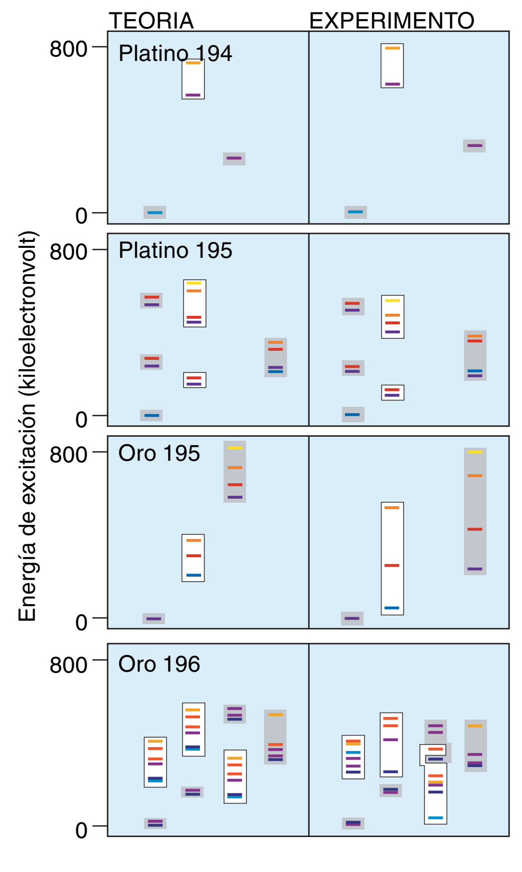
MEDIDA E IDENTIFICACION DE LOS ESTADOS NUCLEARES

LOS NUCLEOS que presentan número par de protones y neutrones difieren mucho de los que tienen número impar (*derecha*). Se debe tales discrepancias al fenómeno siguiente: los protones (y, por su parte, los neutrones) de un núcleo tienden a formar pares que se mueven en estados estables y coordinados. Maria Goeppert Mayer introdujo este concepto en los años cincuenta. En los tipos nucleares más sencillos, los par-par, todos los protones y todos los neutrones se hallan emparejados. Tales núcleos tienen muy pocos estados excitados de baja energía. En los núcleos par-impar, con un número par de un tipo de nucleón y un número impar del otro, el nucleón sin pareja introduce más excitaciones. Los núcleos impar-impar presentan un protón desapareado y un neutrón desapareado; resultan más complicados.



LAS REACCIONES DE TRANSFERENCIA han proporcionado datos cruciales para la observación de la supersimetría nuclear: la determinación de los estados excitados del oro 196. En una típica reacción de transferencia (*abajo*), un protón acelerado incide sobre un núcleo y le arranca un neutrón, con el que forma un deuterón. El núcleo hijo queda en un estado excitado cuya energía se calcula directamente a partir de la energía del deuterón.





LA SUPERSIMETRIA NUCLEAR se revela en los estados de menor energía de cuatro núcleos, conforme a los modelos supersimétricos (*arriba, a la izquierda*) y conforme a las mediciones (*arriba, a la derecha*). Los colores se refieren al momento angular de los estados, que se agrupan de acuerdo con la supersimetría. El ajuste entre la teoría y el experimento, aunque no exacto, es impresionante, habida cuenta la complejidad de este sistema nuclear.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

Fue enunciado en la mitad del decenio de los setenta por Akito Arima, de la Universidad de Tokyo, y Francesco Iachello, por entonces en la Universidad de Groningen. Este modelo analiza los núcleos como si estuvieran formados por parejas de protones y de neutrones —las parejas son los bosones a que se refiere el nombre del modelo—. Arima y Iachello encontraron tres tipos especiales de núcleos par-par en su modelo, asociado cada uno a una simetría determinada. Dos de las clases y sus simetrías ya se conocían del viejo modelo de la gota líquida y se habían estudiado experimentalmente, pero en la tercera figuraba una simetría hasta entonces desconocida en los núcleos. A finales de esa década Richard F. Casten y Jolie A. Cizewski, ambos por entonces en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, descubrieron que los núcleos de platino exhibían la nueva simetría. Dio alas al modelo de los bosones interactivos; pronto quedó claro que era una buena aproximación para muchos núcleos.

Las simetrías predichas por el modelo de los bosones interactivos pertenecen a un tipo especial, el de las simetrías dinámicas. Las simetrías ordinarias (no dinámicas) recuerdan mucho a las que vemos a nuestro alrededor. Un objeto tiene simetría especular cuando no difiere de su reflejo en el espejo. La mano izquierda es aproximadamente la imagen especular de la derecha. Las simetrías dinámicas, por el contrario, no relacionan los objetos mismos, sino las ecuaciones que gobiernan su dinámica. Por desgracia para los experimentadores, sólo una clase limitada de núcleos puede exhibir simetrías dinámicas.

El modelo de los bosones interactivos funciona mejor, por naturaleza, para los núcleos par-par. Un núcleo impar-par se describe en el modelo con n bosones y un fermión, el nucleón desparejado. En algunos casos, las simetrías dinámicas valen para los núcleos impar-par, pero el procedimiento es mucho más complicado que en el caso par-par. En 1980 Iachello, por entonces en Yale, propuso una audaz extensión del modelo de los bosones interactivos a fin de describir los núcleos impar-par de una manera más clara.

La supersimetría en la física de partículas

En el modelo estándar de física de partículas, todas las partículas que forman la materia —quarks y electrones— son fermiones; lo son también otras relacionadas con ellas (muon, tau y neutrinos). Las partículas que generan fuerzas —los fotones, los gluones y las partículas W y Z— son bosones, lo mismo que el gravitón y la partícula Higgs, partículas aún sólo teóricas.

Las simetrías forman la base del modelo estándar. Por una simetría se relacionan electrones y neutrinos electrónicos, que también relaciona los quarks “arriba” con los quarks “abajo”. Una manifestación diferente de la misma simetría asocia las partículas Z y W. Los gluones están vinculados entre sí por una simetría de “color”, que también relaciona diferentes “colores” de quarks. Todas estas simetrías relacionan fermiones con fermiones y bosones con bosones; los estados cuánticos de bosones y fermiones son demasiado distintos para que una simetría ordinaria los conecte.

Entre bosones y fermiones media una diferencia básica: en un conjunto de partículas, si dos fermiones idénticos se intercambian (dos electrones, por ejemplo), el estado cuántico total del conjunto se invierte (imagínese que crestas y valles de una onda se intercambian). Cambiando dos bosones idénticos, por el contrario, se deja inalterado el estado total. Estas características conducen al principio de exclusión de Pauli, que impide que dos fermiones puedan ocupar el mismo estado, y a la propensión de los bosones a reunirse en un estado común, como ocurre en un haz láser y en los condensados de Bose-Einstein.

Las simetrías ordinarias se describen mediante grupos y álgebras de Lie (en honor de Sophus Lie). Esas estructuras matemáticas no pueden introducir ni cancelar la extraña inversión que se produce cuando los fermiones se intercambian; no pueden, pues, transformar fermiones en bosones, ni viceversa. La supersimetría, enunciada en el decenio de 1970, se vale de “álgebras de Lie graduadas,” o superálgebras; en pocas palabras, las transformaciones supersimétricas añaden otro componente fermiónico a cada partícula, con lo que fermiones y bosones se intercambian.

A fin de que las partículas conocidas satisfagan la supersimetría, cada una ha de tener una “supercompañera” —cada bosón presentará una contrapartida fermiónica, y viceversa—. Las partículas conocidas no tienen las propiedades adecuadas para que unas sean las compañeras de las otras, así que se predicen nuevas partículas que expanden el modelo estándar y lo convierten en el modelo estándar supersimétrico. Esos compañeros fermiónicos traen los nombres de fotino, gluino, Wino, Zino, gravitino y higgsino. Los compañeros bosónicos añaden una “s” a sus nombres: selectrón, smuon, sneutrino, squark, etc. Ninguna de estas partículas se ha detectado todavía.

Esta supersimetría de las partículas elementales muestra una relación estrecha con las simetrías del espacio-tiempo en que se basa la teoría de la relatividad especial de Einstein. Con otras palabras, tal supersimetría generaliza las simerías de espacio-tiempo. De muy distinta índole es la supersimetría de los núcleos, que carece de tal conexión con el espacio-tiempo. Pero ambas aplicaciones físicas de la supersimetría se apoyan en superálgebras.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

El universo simétrico

Abundan en la naturaleza las simetrías, exactas o aproximadas: la simetría bilateral de la mayoría de los animales, la simetría rotacional del Sol, la simetría pentagonal de muchas estrellas de mar, las múltiples simetrías de frutos y flores. La simetría es tan corriente que precisamos de algo tan extraordinario como un copo de nieve para despertar nuestra admiración.


SNOWCRYSTALS.NET

Buena parte de la física fundamental se afana en descubrir otras clases de simetrías que caracterizan el universo. La teoría de la relatividad especial de Einstein, por ejemplo, es una teoría de las simetrías del espacio vacío y del tiempo, gobernadas por el grupo de Poincaré. (Los grupos son las estructuras matemáticas que describen las simetrías.) La contracción de las longitudes y la dilatación del tiempo, que aplanan los relojes que se mueven deprisa y hacen que vayan más despacio, son operaciones del grupo de simetría, similares a girar el punto de vista en el espacio, pero con el tiempo formando parte de la "rotación."

La física de partículas está repleta de simetrías. En ella, las fuerzas fundamentales son dictadas por simetrías "de gauge" (o de aforo, o de contraste). En cuanto se especifica el grupo de aforo y la intensidad de la interacción, la naturaleza de la fuerza queda, en esencia, determinada. El electromagnetismo, por ejemplo, está ligado al grupo de simetría de aforo U(1), la simetría de las rotaciones de un círculo en un plano.

La conservación de la carga eléctrica es una consecuencia de la simetría U(1). Tal como demostró Emmy Noether en 1915, allá donde haya en mecánica una simetría, habrá una ley de conservación. Su teorema vale tanto para la mecánica clásica como para la cuántica. La ley de la conservación de la energía se deduce de la simetría con respecto a las traslaciones en el tiempo. Es decir, la energía se conserva porque las ecuaciones del movimiento son hoy las mismas de ayer. Algo similar sucede con la conservación del momento (la simetría bajo las traslaciones en el espacio) y del momento angular (la simetría bajo las rotaciones).

Por último, veamos la definición misma de "partícula" en la teoría cuántica de campos, expuesta por Eugene Wigner: una partícula es una "representación irreducible del grupo de Poincaré." Esta ligazón directa de la simetría con la estructura última de la materia y las fuerzas impone a los electrones y demás partículas una cantidad de momento angular intrínseco, o espín. El espín actúa como un distintivo que especifica la "representación irreducible" correspondiente a la partícula en cuestión; se asocia con las rotaciones y, por tanto, con el momento angular. La masa de una partícula también es una etiqueta relacionada con la simetría.

—Graham P. Collins, de la redacción

Consistía en relacionar el núcleo con n bosones y un fermión con el de $n + 1$ bosones por medio de la supersimetría. Si esa supersimetría dinámica tenía lugar en la naturaleza, se pondría de manifiesto en el esquema de los estados excitados de un núcleo impar-par y en el del par-par contiguo —por ejemplo, en los estados del arsénico 75 (33 protones y 42 neutrones) y del selenio 76 (34 protones y 42 neutrones)—. Los estados cuánticos se clasifican conforme a sus números cuánticos, que organizan los estados en grupos según diversas propiedades, entre ellas el momento angular. Con la supersimetría dinámica, bastaría un conjunto único de números cuánticos para clasificar los estados de los dos núcleos en grupos relacionados. Se podría empezar con los estados más sencillos del par-par selenio 76 y predecir los del arsénico 75 (es decir, predecir qué estados existirían y sus propiedades, como el momento angular y la energía aproximada).

Durante los años ochenta, los experimentadores recogieron datos de núcleos capaces de exhibir simetrías dinámicas; encontraron indicios de supersimetría, pero no confirmaron de manera inequívoca la idea de Iachello. No se pudo determinar completamente la estructura de un núcleo impar-par a partir del núcleo par-par asociado.

Cuadrados mágicos

En 1984 Pieter Van Isacker, Kristiaan L. G. Heyde y el autor, los tres por entonces en la Universidad de Gante, junto con Alejandro Frank, de la Universidad de México, propusieron una extensión de la supersimetría de Iachello. La idea consistía en seguir los pares de neutrones y protones por separado. Con esta supersimetría extendida se describe un cuarteto de núcleos mediante un solo esquema. Ese "cuadrado mágico" consta de núcleos que tienen el mismo número total de bosones (nucleones apareados) y fermiones (nucleones desapareados): un núcleo par-par, dos impar-par y uno impar-impar. No hay objetos más complejos en el estudio de la estructura nuclear a baja energía que los núcleos pesados impar-impar, con más de cien nucleones; pero si esta nueva supersimetría dinámica actúa en la naturaleza, el espectro de energía del núcleo impar-impar se predice a partir del espectro, más sencillo, de sus tres compañeros en el cuadrado mágico. La observación experimental de tal simetría revestía interés no sólo para la física nuclear, sino también para las demás aplicaciones físicas de la supersimetría: aunque los teóricos se valen mucho de ella, carecía de verificación experimental.

La confirmación de estas ideas requiere conocimientos detallados de los núcleos pesados impar-impar. Numerosos grupos experimentales y teóricos emprendieron la labor. Se encontró algún limitado indicio de la supersimetría, pero la meta más preciada, un esquema detallado de los estados del oro 196, permaneció fuera de alcance. Se consideraba que este núcleo, con 79 protones y 117 neutrones, era la prueba de fuego definitiva de la supersimetría en la física nuclear, por tres razones. La

primera: la región nuclear a la que pertenece (los núcleos que tienen unos 80 protones y unos 120 neutrones) exhibe simetrías dinámicas y cumple otras condiciones técnicas necesarias para que se presente la supersimetría. La segunda: en esa región es donde más cuesta describir los núcleos impar-impar. La tercera: en 1989 predijimos por medio de la supersimetría un importante grupo de sus estados. Ninguno de ellos se conocía todavía experimentalmente; los experimentos podrían, pues, confirmar o refutar la teoría.

La búsqueda experimental

Para estudiar los núcleos atómicos, se los bombardea con neutrones, fotones o partículas aceleradas, que los excitan, y se observa cómo reaccionan. Los estados excitados son inestables. El núcleo retorna enseguida a su estado de menor energía; de camino, va cayendo de unos estados a otros emitiendo fotones de energía elevada en forma de rayos gamma o X, que se pueden medir con precisión.

Pero la radiación procedente de los núcleos impar-impar es complejísima, debido a los muchos estados poblados; las energías de los fotones emitidos son las diferencias de energías entre esos estados. Los núcleos par-par y los par-impar son más sencillos porque tienen menos estados a energías bajas. El isótopo 196 del oro presenta una dificultad adicional: es radiactivo y se desintegra en alrededor de una semana, la mayor parte de las veces mediante la captura de un electrón y transformándose en platino 196. Los experimentadores han de crearlo continuamente, bombardeando un isótopo estable con partículas aceleradas, protones por ejemplo.

Costaba tanto deducir la estructura del oro 196 de tales mediciones, que algunos equipos abandonaron el empeño. Según uno de los grupos, los datos experimentales indicaban que la supersimetría dinámica estaba rota. En ese momento de desesperación, hacia la mitad de los años noventa, establecíamos una nueva colaboración: mi grupo de la Universidad de Friburgo, en Suiza, se unía a los grupos de Christian Günther, de la Universidad de Bonn, y Gerhard Graw, de la Universidad de Múnich. Más adelante, el grupo de Casten, de Yale, también contribuyó. Planeamos un último intento de estudiar el oro 196 mediante espectroscopía en haz, que mide la radiación emitida por los iones de oro 196 creados en un haz de partículas. Usamos tres instalaciones: el ciclotrón Philips del Instituto Paul Scherrer, en Suiza, el ciclotrón de Bonn y el acelerador Tandem WSNL de Yale.

El grupo de Graw realizó un experimento de “transferencia” que complementó los resultados en haz y solucionó una problema fundamental —la razón de las dificultades que habían desbaratado anteriores esfuerzos—. En un experimento de transferencia el proyectil incide en el núcleo blanco y se lleva uno de sus nucleones, dejando detrás un núcleo hijo en un estado excitado. Identificamos la partícula saliente y medimos su energía. Al hacer el balance, faltará la energía de excitación del núcleo hijo. De esta manera, los experimentos de transferencia producen datos diferentes de los aportados por la espectroscopía en haz: determinan directamente la energía de los estados excitados de un núcleo en vez del número, mucho mayor, de diferencias energéticas entre los estados. Además, con haces de proyectiles polarizados y el estudio de la forma en que salen proyectados los productos de la colisión, obtenemos información sobre el momento angular de los estados excitados.

Para investigar los niveles de energía, muy juntos, del oro 196 usamos los medios más modernos, con los que está equipado el espectrómetro magnético Q3D del laboratorio del acelerador de Múnich. Cuando Alexander Metz y sus colaboradores de la Universidad de Múnich analizaron los experimentos de transferencia, encontraron que el estado fundamental del oro 196 es un doblete —dos niveles de energía muy juntos—. Semejante hallazgo resultó crucial en la solución de los problemas con que tropezaba la investigación de los estados de ese núcleo. Estos experimentos también revelaron directamente las energías de la mayoría de los estados excitados. Una vez establecido el marco, podíamos determinar el espín y la paridad de cada excitación a partir de los datos obtenidos en haz.

Los resultados concordaban con las predicciones teóricas basadas en la supersimetría dinámica. Los estados de los cuatro núcleos se clasificaban mediante un conjunto común de números cuánticos supersimétricos; una sola expresión matemática, con unos pocos parámetros nada más, se ajusta a los niveles de energía de manera aceptable. Que se haya logrado algo así para uno de los núcleos atómicos más complejos constituye una confirmación convincente de la supersimetría dinámica, pero plantea a los teóricos nuevas dificultades. Cabe estudiar el oro 196 como un caso individual del problema de la interacción de muchos objetos cuánticos. Hay que explicar, desde la perspectiva de la teoría cuántica de muchos cuerpos, por qué las excitaciones del oro 196 están gobernadas por la supersimetría dinámica. Varios grupos trabajan a fondo en esta cuestión.

En diversas parcelas de la física aparecen fermiones apareados que se comportan como bosones; una de ellas es la superconductividad. Una supersimetría dinámica como la observada en núcleos atómicos podría también ser útil en estos campos. Una cosa es cierta: las simetrías, sean “súper” u ordinarias, seguirán marcando el son al que bailará la física cuántica.

Bibliografía complementaria

SUPERSYMMETRY STANDS THE TEST. Piet Van Isacker en *Physics World*, vol. 12, n.º 10, págs. 19-24; octubre 1999. http://physicsweb.org/article/world/12/10/3

NUCLEAR STRUCTURE OF ^{196}AU: MORE EVIDENCE FOR ITS SUPERSYMMETRIC DESCRIPTION. J. Gröger et al. en *Physical Review C*, vol. 62, n.º 6, páginas 64.304-64.329; 2000.

SUPERSYMMETRY IN NUCLEI. F. Iachello en *Nuclear Physics News*, vol. 10, n.º 2, páginas 12-15; 2000.

Agujeros negros acústicos

Puesto que la propagación del sonido en un fluido en movimiento es análoga a la de la luz en un espacio-tiempo curvo, se han concebido "agujeros negros acústicos" con propiedades muy parecidas a las de los agujeros negros astronómicos

Renaud Parentani

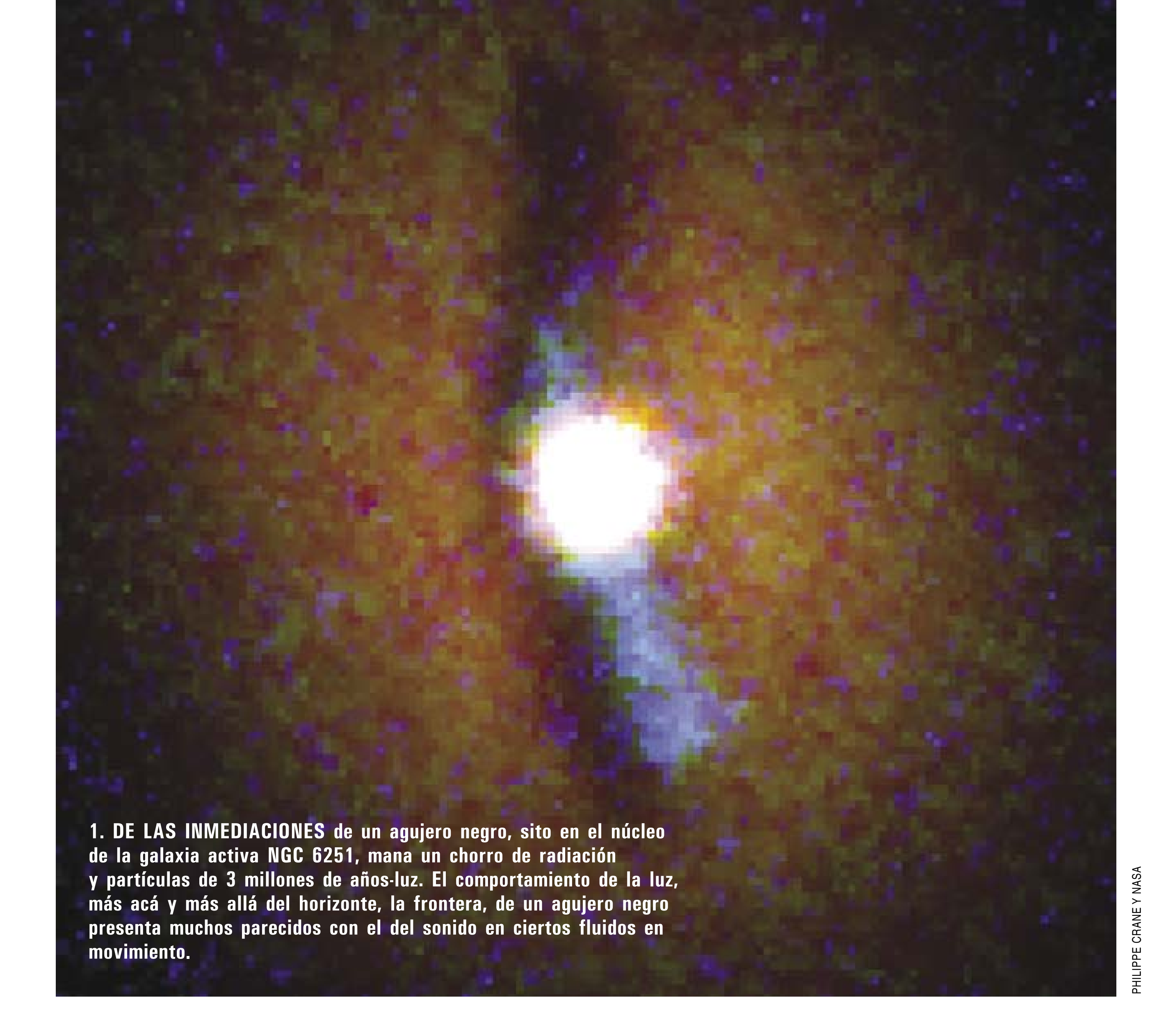
A principios del siglo XX, tres teorías sacudieron nuestra concepción del mundo físico: la relatividad especial, la relatividad general y la mecánica cuántica. La primera se caracteriza por el abandono de la concepción galileana del espacio y del tiempo en favor de una geometría de cuatro dimensiones, el espacio-tiempo, en la que el tiempo y las tres dimensiones espaciales forman un todo. Al adoptar esta teoría, Einstein rechazó igualmente que la luz proviniese de las vibraciones de un hipotético sustrato material denominado éter, idea que había prevalecido a lo largo del siglo XIX. Según la concepción relativista del mundo físico, las ondas luminosas se desplazan en el vacío sin necesidad alguna de sustrato y a una velocidad constante. La relatividad general y la mecánica cuántica no alteraron esta propiedad de la luz.

En el transcurso del siglo XX se han desarrollado estas tres teorías y se las ha comparado con los datos experimentales. Empresa coronada con éxito universal, ya que la totalidad de los fenómenos observados en el laboratorio recibe ahora una explicación coherente. Y sin embargo, persiste una sombra: contrariamente a la relatividad especial, la relatividad general no se lleva bien con la mecánica cuántica. Pasados 70 años, las tentativas de conciliar ambas teorías han fracasado y carecemos todavía de una teoría cuántica de la gravitación. Afortunadamente, los efectos de tal teoría sólo se manifestarían a distancias muy pequeñas (del orden de 10^{-35} metros), muy por debajo de la resolución de los experimentos actuales (*véase el recuadro* "¿Qué es la escala de Planck?"). De todas maneras, habría que disponer de una teoría cuántica de la gravitación para estudiar los fenómenos cuánticos propios de los agujeros negros, ya que dejan traslucir las propiedades del espacio-tiempo a escalas muy pequeñas; el estudio de las propiedades cuánticas de los agujeros negros constituye un acicate para los físicos que intentan unificar la relatividad general y la mecánica cuántica. Frente a las tenaces dificultades, algunos han decidido sacar partido de las analogías entre la propagación de la luz y la del sonido en un fluido, que puede domeñarse mejor. Sus trabajos dan a entender que a distancias muy pequeñas el espacio-tiempo quizá se comporte como un fluido material. De resultar cierto, constituiría un irónico vuelco de la situación, pues la noción de éter quedaría de alguna manera rehabilitada, tras 100 años de abandono.

Antes de mostrar el provecho, tanto teórico como experimental, que se puede sacar de estas analogías, expliquemos por qué el estudio de los agujeros negros nos arrastra hacia la gravitación cuántica.

La luz y el espacio-tiempo curvos

La relatividad general se funda sobre dos hipótesis. En primer lugar, se establece como premisa que los objetos materiales y la luz se mueven en un espacio-tiempo curvo de cuatro dimensiones (tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal). A continuación, se supone que la curvatura del espacio-tiempo queda determinada por la distribución de la materia y la energía. Debido a esta curvatura, la luz ya no se desplaza en línea recta, como ocurre en un espacio plano —o euclídeo—, sino a lo largo de curvas llamadas geodésicas. De este modo, en las cercanías de un astro de gran masa, los rayos luminosos siguen trayectorias curvas. Esto lo verificó por primera vez en 1919 el astrónomo Arthur Eddington, quien constató, aprovechando un eclipse de Sol, que las estrellas situadas



1. DE LAS INMEDIACIONES de un agujero negro, sito en el núcleo de la galaxia activa NGC 6251, mana un chorro de radiación y partículas de 3 millones de años-luz. El comportamiento de la luz, más acá y más allá del horizonte, la frontera, de un agujero negro presenta muchos parecidos con el del sonido en ciertos fluidos en movimiento.

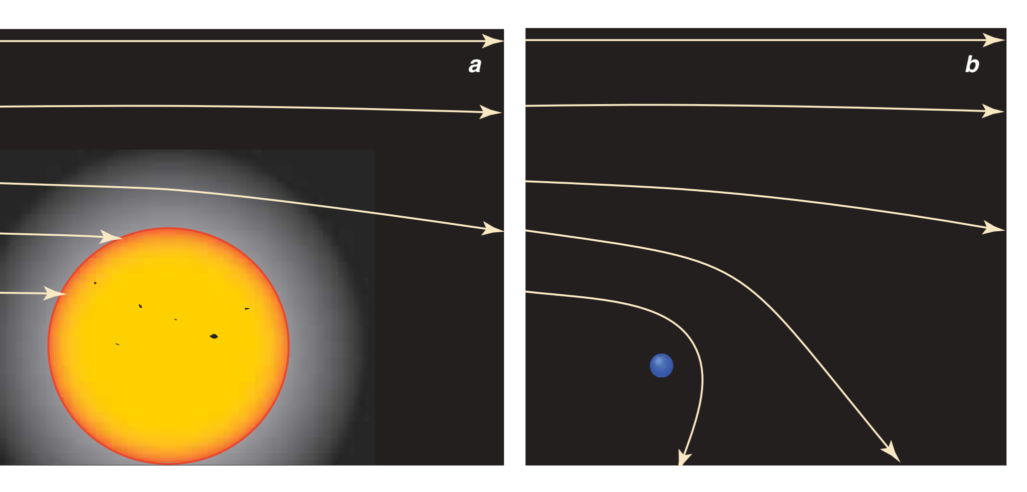
PHILIPPE CRANE Y NASA

cerca del disco solar aparecían desplazadas de su posición habitual. Estas desviaciones se deben a que la curvatura del espacio-tiempo, engendrada por la masa del Sol, deforma las geodésicas seguidas por los rayos luminosos (*véase la figura 2*).

Del mismo modo, el estudio de los agujeros negros se funda en el examen de las deformaciones de las geodésicas que se aventuran en sus cercanías. En cuanto al origen de estos astros en nuestro universo, digamos simplemente que la evolución de las estrellas de masa mayor que la solar conduce a menudo a la formación de agujeros negros: una vez que una estrella ha agotado su combustible, la materia que la compone se desploma sobre sí misma por su propio peso y, según la relatividad general, se concentra en un punto de densidad infinita, una singularidad. El espacio-tiempo que rodea esta singularidad se halla por tanto vacío, desprovisto de materia; su propiedad más sobresaliente es la de estar dividido en dos regiones diferenciadas: una región interna, el agujero negro, donde todos los rayos son inexorablemente atraídos hacia la singularidad, y una región externa, de la que pueden escapar ciertos rayos luminosos, que llegarán a observatorios remotos. La superficie que separa ambas regiones se denomina horizonte. En virtud del carácter límite de la velocidad de la luz, el horizonte constituye la frontera más allá de la cual ninguna señal puede llegar hasta un observador remoto. Por otro lado, el horizonte no constituye en modo alguno un obstáculo material; nada impide franquearlo para entrar en la región interna (basta dejarse atraer por el agujero negro). De todas maneras, una vez atravesado, no se podría comunicar lo que se observase al exterior. Se puede visualizar esta separación del espacio en dos regiones trazando un conjunto de rayos luminosos “provenientes” de un agujero negro en dirección a un observador lejano (*véase la figura 3*).

La radiación de los agujeros negros

Al estudiar las propiedades de la radiación emitida por un agujero negro, se obtienen resultados muy diferentes según se utilice la descripción clásica o la cuántica de la luz. La descripción clásica de la luz data de mediados del siglo XIX. En este marco, la luz queda descrita



2. LA DESVIACION DE LOS RAYOS LUMINOSOS por el Sol (*a*) es tanto mayor cuanto más cerca de la superficie pasa el rayo. Cerca de un agujero negro de una masa solar (*b*), para la misma distancia al centro del astro, el ángulo de desviación es idéntico al inducido por el Sol. Mas como el radio del horizonte del agujero negro es muy pequeño (de unos 6 kilómetros, en vez de los 700.000 kilómetros del Sol) los rayos penetran en regiones donde la curvatura es superior, con mayores desviaciones. Los rayos rasantes con el horizonte se doblan hasta caer, irremisiblemente, en el centro del agujero negro.

por ondas electromagnéticas y los rayos luminosos (las líneas perpendiculares en cada punto a los frentes de onda) siguen las geodésicas del espacio-tiempo: rectas, si el espacio-tiempo es plano; curvas, en caso contrario. Si bien esta descripción concuerda con numerosos resultados experimentales, hubo que desecharla, pues no sirve para explicar las propiedades corpusculares de la luz. A principios del siglo XX se elaboró una segunda descripción, llamada cuántica, para solventar esta dificultad. En el nuevo marco, los flujos luminosos están constituidos por "granos" de luz denominados fotones. Hay que subrayar que esta nueva descripción concuerda perfectamente con todos los resultados experimentales. Notemos igualmente que las descripciones clásica y cuántica coinciden siempre que las propiedades corpusculares de la luz no sean esenciales, como es el caso, en general, de los fenómenos macroscópicos.

El autor

RENAUD PARENTANI enseña en la Universidad de Tours; lleva a cabo sus investigaciones en el departamento de matemáticas y física teórica.

Puesto que los agujeros negros poseen una masa muy grande —son, por tanto macroscópicos—, es razonable pensar que la teoría clásica de la luz describe correctamente qué radiación luminosa pueden desprender. Desde esta perspectiva, la luz emitida (hacia un observador lejano), proveniente de un punto cercano a un agujero negro, queda "enrojecida": su longitud de onda aumenta —su frecuencia disminuye— en un factor tanto mayor cuanto más cerca del horizonte haya sido emitida. De manera concomitante, cuanto más cerca de esta frontera fatídica se emita una onda, más tiempo invertirá en llegar a un observador lejano. En el límite, un rayo de luz proveniente de un punto situado exactamente sobre el horizonte invierte un tiempo infinito en alcanzar al observador. Esta dilatación de las longitudes de onda y de las duraciones en derredor de un astro pesado es una de las consecuencias de la relatividad general (el fenómeno incluso se ha podido medir en el campo gravitatorio terrestre). Lo particular de los agujeros negros es que estos efectos tienden a infinito si la onda luminosa se emite desde el horizonte. En suma, durante la fase final del colapso gravitatorio se forma el horizonte y el astro ennegrece, ya que las ondas luminosas que intentan escapar enrojecen hasta el punto de perder toda su energía. A partir de ese momento, el astro que ha sufrido el colapso permanece —ya que nada puede escapar de él— inexorablemente negro.

Estas propiedades clásicas habían sido objeto de numerosos estudios a principios de los años setenta; todos confirmaban que un agujero negro absorbe la materia y la radiación, pero no emite nada. Cabe imaginar, por tanto, la sorpresa que causó en 1974 el artículo de Stephen Hawking en el que demostraba que, conforme a la descripción cuántica de la luz, los agujeros negros emiten una radiación térmica constante. Tras superar cierto escepticismo, los físicos acabaron por admitir este desconcertante resultado, que desde entonces ocupa un puesto central en las investigaciones consagradas a la gravedad cuántica.

Y es que la radiación de los agujeros negros tiene un origen puramente cuántico. Proviene de que en el vacío tengan lugar fluctuaciones: aparecen y desaparecen en él sin cesar pares de fotones. En virtud de las relaciones de indeterminación de Heisenberg, la subsistencia de estos fotones es tanto más breve cuanto mayor sea su energía. Estos fotones se denominan "virtuales", pues en el espacio-tiempo plano el balance de las fluctuaciones es nulo. En cambio, cuando tienen lugar en un espacio-tiempo que se modifica con el paso del tiempo, las fluctuaciones se amplifican, lo que se traduce en la producción neta de un flujo de fotones: de "virtuales", algunos se convierten en "reales". Así, la radiación descubierta por Hawking es el eco de la formación de un horizonte de agujero negro. No obstante, esta radiación posee una propiedad notable: su intensidad y su temperatura son constantes. ¿Cómo es posible que continúen llegando fotones años después de que ocurriera el colapso gravitacional?

En 1974, esta cuestión preocupaba de tal modo a Hawking que retrasó la publicación de su descubrimiento. La razón fue la siguiente. Como se ha señalado, cuanto más tiempo tarda un fotón —a partir del colapso— en alcanzar un observa-

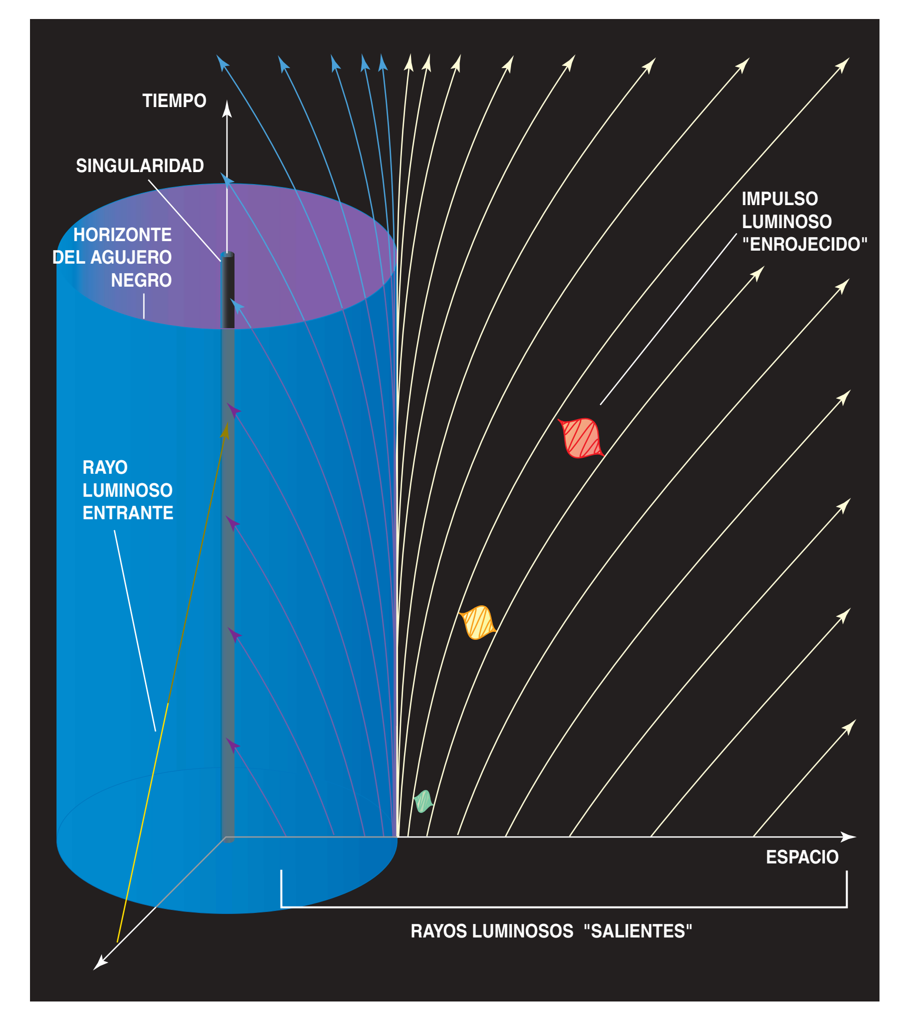
dor lejano, más cerca del horizonte se ha emitido y más se ha enrojecido. A medida que transcurre el tiempo, los fotones de la radiación de Hawking proceden de regiones más y más cercanas al horizonte; la energía que poseían en el momento de su producción va siendo cada vez más elevada (si no, la temperatura de la radiación disminuiría muy rápidamente). Para explicar el carácter constante de esta radiación, hay que recurrir, por tanto, a la emisión de fotones cada vez más energéticos. El problema es que nos adentramos en un dominio de la física todavía desconocido.

En el ámbito de las energías muy grandes, que se corresponden con las frecuencias muy elevadas o las distancias muy cortas, existe un límite, denominado "escala de Planck", a partir del cual las leyes de la física conocida pierden su validez (*véase el recuadro* "¿Qué es la escala de Planck?"). Así, el horizonte de un agujero negro se comporta como un fantástico microscopio que nos pone en contacto con una física todavía por descubrir. Mas si la radiación de Hawking tiene su origen al margen de la física conocida, ¿no conviene mostrarse prudente ante la exactitud de las propiedades que se le atribuyen? Estas últimas, ¿no dependerán quizá, de manera implícita, de hipótesis infundadas?

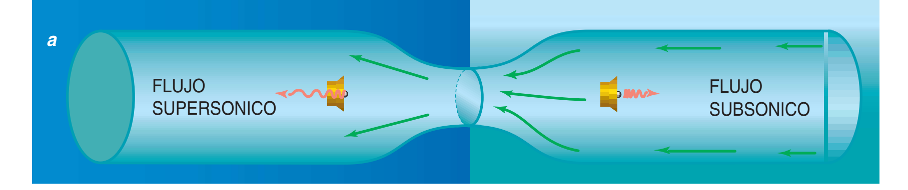
Durante más de diez años tales cuestiones quedaron en suspenso, pues parecían insolubles. Sin embargo, a principios de los noventa, varios físicos, entre ellos Ted Jacobson, de la Universidad de Maryland, las suscitaron de nuevo. Para soslayar las dificultades, recuperó una idea de William Unruh, de la Universidad de Vancouver, quien había mostrado en 1981 la existencia de una profunda analogía entre la propagación de ondas sonoras en un fluido en movimiento y la de la luz en un espacio-tiempo curvo. No sólo eso; Unruh había propuesto utilizar la misma comparación para abordar el problema de las altísimas energías que subyacen en el origen de la radiación de Hawking. En 1995, retomó su propia idea, que dormitaba desde hacía 14 años, y demostró su utilidad. Examinemos en qué consiste.

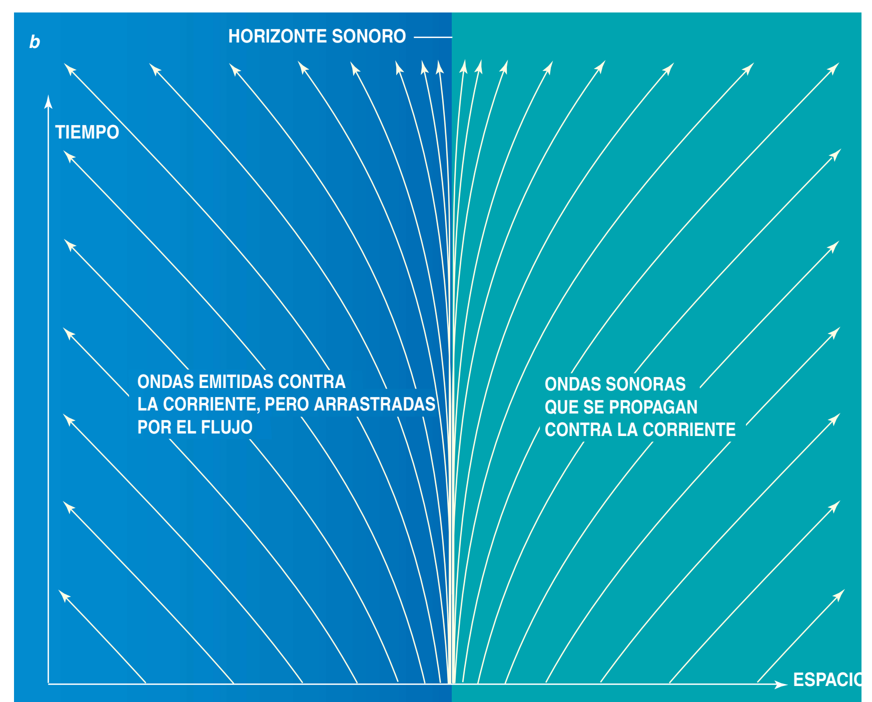
Ondas sonoras y fonones

Dentro de un fluido en reposo, y a causa de la agitación térmica, la densidad de las moléculas fluctúa de manera errática en torno a un valor medio. Además de estas fluctuaciones desordenadas, existen fluctuaciones ordenadas que involucran a un elevado número de moléculas, cubriendo distancias mucho mayores que la distancia intermolecular: las ondas sonoras. Presentan numerosas analogías con las ondas luminosas. Al igual que éstas, se caracterizan por poseer una longitud de onda, una frecuencia y una velocidad de propagación constantes. En general, sin embargo, el paralelismo no se prolonga hasta el nivel cuántico. En los fluidos ordinarios, los movimientos desordenados de origen térmico impiden la aparición de fenómenos cuánticos. Aun así, en algunos fluidos enfriados a una temperatura tan baja que las fluctuaciones térmicas se vuelven irrelevantes, el conjunto de moléculas se rige por la mecánica cuántica. En este tipo de fluido, las ondas sonoras "heredan" propiedades cuánticas



3. EL ESPACIO-TIEMPO alrededor de un agujero negro: se representan los rayos luminosos emitidos hacia un observador remoto. Lejos del agujero negro forman rectas inclinadas a 45 grados (se han elegido las unidades de tiempo y de longitud de manera que la velocidad de la luz tiene valor unidad). Cerca del agujero negro son curvos, manifestación de la curvatura del espacio-tiempo. Cuando son emitidos desde el exterior del horizonte logran escapar, mientras que si se los emite desde el interior caen hacia la singularidad, en el centro del agujero negro. Al alejarse del horizonte, las ondas luminosas sufren un enrojecimiento gravitatorio, que tiende a infinito cuando la onda se emite desde el horizonte. Esto se traduce en la extrema acumulación de geodésicas sobre esa frontera.





4. EN ESTA TOBERA DE LAVAL (*a*) el fluido circula de derecha a izquierda. La velocidad del fluido aumenta al acercarse al estrangulamiento: es inferior a la del sonido en el fluido antes del estrangulamiento, superior después. Rebasa la velocidad del sonido en el punto más estrecho. En este flujo, las trayectorias seguidas por los fonones tienen propiedades parecidas a las de los fotones en las cercanías de un agujero negro gravitatorio. Se verifica dibujando esas trayectorias (*b*). A la derecha, en la región subsónica, las ondas emitidas a contracorriente logran escapar (remontando la corriente), mientras que las emitidas en la región supersónica son arrastradas corriente abajo.

de las moléculas por las que viajan. Todo ocurre entonces como si las ondas sonoras estuvieran constituidas por partículas; a esos “granos de sonido” se les llama fonones para subrayar su analogía con los fotones. Para estos fluidos, la descripción de las ondas sonoras, clásica o cuántica, es similar a la de la luz. Detengámonos ahora en la propagación de estas ondas.

Mientras un fluido permanezca en reposo, los fonones se desplazarán en línea recta, como las ondas luminosas en una geometría plana. En el caso de que el flujo del fluido sea uniforme, la propagación de las ondas sonoras continuará siendo rectilínea. El único cambio notable es que las ondas sonoras sufren el efecto Doppler: cuando una onda se propaga contra corriente, su frecuencia es más baja que si estuviera en un fluido en reposo. Inversamente, la frecuencia de una onda es más elevada si se propaga en el sentido de la corriente. Estos efectos Doppler dependen sólo del movimiento relativo del fluido respecto al laboratorio donde se realizan las mediciones. Así, un observador que acompañara el movimiento del fluido no percibiría efectos; para él, todo ocurriría como si el fluido permaneciera en reposo.

Observar la radiación de Hawking

¿Sería posible preparar experimentos en los que se midiera la radiación emitida por un agujero negro acústico? Todavía se debate. De la misma manera que la temperatura de radiación de los agujeros negros gravitatorios es muy débil, la de los agujeros negros acústicos (determinada por la velocidad del sonido y por la aceleración con la que las trayectorias se alejan del horizonte) sería del orden de 10^{-6} kelvin, demasiado baja para detectarla fácilmente.

Para vencer esta dificultad habrá que escoger con cuidado el tipo de agujero negro acústico que se emplee. En este artículo hemos detallado el caso más simple. Pero parece más prometedor elaborar un par de agujeros negros asociados a un doble cruce de la velocidad del sonido. La velocidad del fluido se aumenta primero de la manera descrita y luego se disminuye para producir de nuevo un flujo subsónico. El horizonte asociado a este segundo paso por la barrera de velocidad se comporta como la versión simétrica en el tiempo del horizonte de un agujero negro: se habla de un “agujero blanco”, pues las geodésicas, en vez de alejarse del segundo horizonte, convergen en él. Este tipo de horizonte es inaccesible para los agujeros negros gravitatorios (si existe, reside escondido en el interior del horizonte negro), mas no para los agujeros negros acústicos. Steven Corley y Ted Jacobson han demostrado que la configuración con dos horizontes conduce —en ciertos casos— a un efecto láser que amplifica la radiación de Hawking y facilita, por tanto, su observación.

Por otra parte, se deberá escoger cuidadosamente el fluido que sirva de sustrato a los fonones. Algunos ponen sus esperanzas en los condensados de Bose-Einstein, cuyas ondas sonoras tienen propiedades cuánticas bien definidas; otros preferirían simular un agujero negro óptico con un gas muy frío en el que la velocidad de la luz se frenase hasta algunos metros por segundo. Sin embargo, por lo que sabemos, todas estas opciones se enfrentan todavía a limitaciones intrínsecas o técnicas. Sea de ello lo que fuere, los esfuerzos se redoblan para encontrar una estrategia satisfactoria.

Por el contrario, cuando el flujo no es uniforme (un fluido que se acelera en una tobera), las ondas sonoras ya no viajan a velocidad constante y su frecuencia depende del lugar donde se mida. Además, sus trayectorias en el espacio-tiempo se curvan. En este caso, se comprueba que ya no existe un sistema de referencia que permita anular los efectos Doppler en todos los puntos del flujo y considerar que todo ocurre como si el fluido estuviera en reposo. Unruh ha demostrado que tal imposibilidad se debe a que los fonones viajan efectivamente en una "geometría acústica" curva, que define las trayectorias que siguen los fonones tal y como la geometría del espacio-tiempo lo hace para los fotones. La diferencia con la relatividad general consiste en que la geometría acústica viene determinada por el movimiento del fluido y no por la distribución de la materia. Una vez establecida esta correspondencia, ¿cabe elegir un flujo que dé lugar a una geometría acústica parecida a la geometría en la vecindad de un agujero negro? La respuesta es afirmativa.

Los agujeros negros acústicos

Para elaborar un agujero negro acústico, "basta" emplear una tobera de Laval (*véase la figura 4*). Este dispositivo consta de un conducto cilíndrico que presenta un estrangulamiento concebido para acelerar el fluido a una velocidad supersónica, a la vez que asegura la regularidad del flujo. Así, en la tobera la velocidad de la corriente alcanza y sobrepasa la velocidad del sonido en el fluido, sin causar la deflagración sonora que acostumbra producirse cuando se franquea la barrera del sonido. La geometría acústica asociada a este flujo se parece mucho a la de un agujero negro. Esto se verifica analizando las trayectorias que siguen las ondas sonoras. En la región donde el flujo es supersónico, las ondas que se propagan contracorriente se arrastran inexorablemente curso abajo, como ocurre con las ondas luminosas en la región interna de un agujero negro. La frontera de esta región, la sección de la tobera donde el flujo alcanza la velocidad del sonido, actúa a manera de horizonte de agujero negro: separa las ondas en dos clases, las que pueden remontar el flujo corriente arriba y las que no pueden. Por otra parte, en la región subsónica, las ondas que remontan la corriente pierden energía conforme se alejan del horizonte, como los fotones sometidos al enrojecimiento gravitacional. De este modo, se recuperan las principales propiedades que caracterizan el horizonte de un agujero negro.

El estudio de los agujeros negros acústicos aporta algo más trascendente que un paralelismo sugerente, y ello por dos razones. En primer lugar, es de esperar que se realicen experimentos de laboratorio que pongan de manifiesto la radiación de Hawking (*véase el recuadro* "Observar la radiación de Hawking"), es decir, experimentos donde se detecte un flujo térmico de fotones proveniente de fluctuaciones cuánticas en la vecindad de un horizonte acústico. Recordemos que en lo que concierne a los agujeros negros del cosmos, la radiación de Hawking tiene una temperatura tan baja (una diezmillonésima de kelvin) que es indetectable, y así permanecerá. En consecuencia, importa sobremanera poder verificar experimentalmente esta predicción que se desprende de la aplicación de la mecánica cuántica a un espacio-tiempo curvo.

Por de pronto, esta analogía ha aclarado ya a los físicos el cometido de las frecuencias muy elevadas que se encuentran en el germen de la radiación de Hawking. Como hemos subrayado, en virtud de los efectos de enrojecimiento que tienden a infinito en las vecindades del horizonte, recibimos fotones testigos de una física desconocida para nosotros. La comparación entre fonones y fotones nos ayudará a saber si las propiedades de esta radiación dependen o no de esa física desconocida. He aquí cómo.

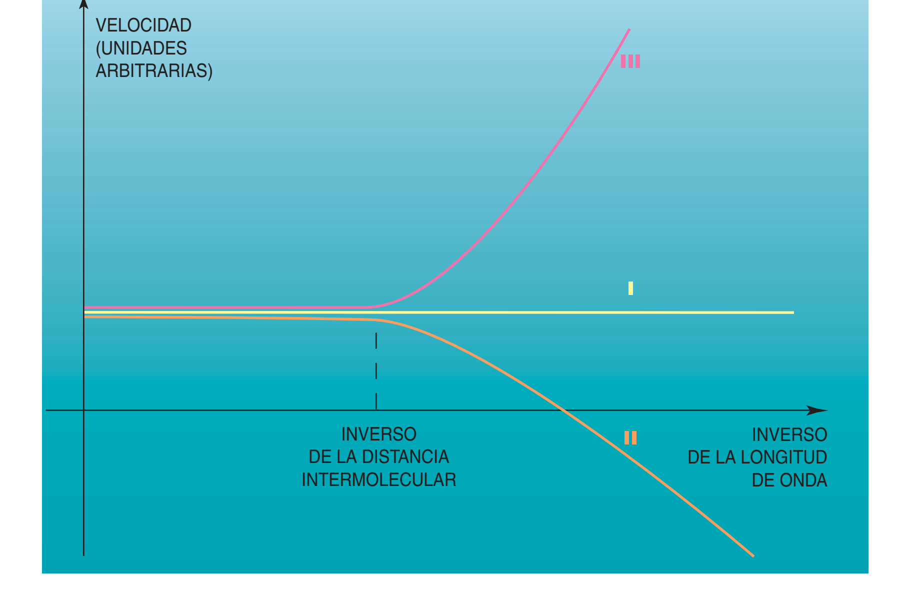
Las propiedades de los fonones de pequeña longitud de onda (y por tanto de alta frecuencia y de elevada energía), bien conocidas, difieren

¿Qué es la escala de Planck?

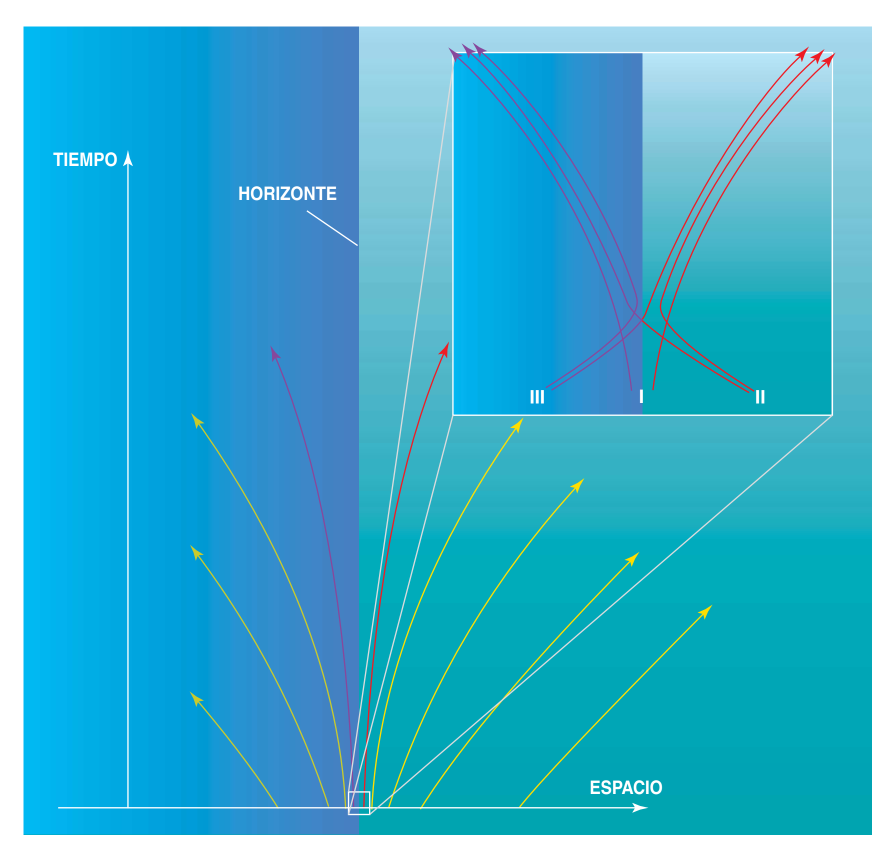
Cada una de las tres teorías en que se fundamenta la física del siglo XX se caracteriza por una constante fundamental. La relatividad restringida establece que la frecuencia f de una onda luminosa en el vacío está relacionada con su longitud de onda l mediante la relación $f\,l = c$, donde c es la velocidad de la luz. La relatividad general pone en relación la masa de un objeto con la curvatura del espacio-tiempo que lo rodea. De acuerdo con ella, el radio del horizonte de un agujero negro de masa M viene dado por la fórmula $R = 2GM/c^2$, donde G es la constante de la gravitación de Newton. Por último, la mecánica cuántica relaciona la frecuencia de un fotón con su energía, estipulando que una onda luminosa de frecuencia f está formada por fotones cuya energía es $E = hf$, donde h es la constante de Planck.

Cuando Planck descubrió esta relación, expuso que las constantes c, G y h definen un sistema de unidades fundamentales. La longitud de Planck vale $l_p = \sqrt{Gh/c^3}$, unos 2×10^{-35} metros. De ahí se deduce, mediante la relación $f_p = l_p/c$, que la frecuencia de Planck vale 10^{43} hertz y la energía de Planck, $E_p = hf_p$, 10^{28} electronvolt. En los fenómenos caracterizados por esas escalas no se pueden despreciar los efectos cuánticos de la gravedad.

¿Qué ocurre en ese caso? La situación no está clara. Por una parte, carecemos de datos experimentales, pues las energías quedan fuera de nuestro alcance: actualmente no se llega a energías de más de 10^{12} electronvolt, o sea, 16 órdenes de magnitud por debajo de la escala de Planck. Esta es la razón de que no se hayan observado aún los efectos gravitatorios cuánticos. Por otra parte, para explorar teóricamente estas escalas habría que disponer de una teoría cuántica de la gravitación. Por desgracia, la relatividad general y la mecánica cuántica no son compatibles hoy en día. En este contexto incierto, la física cuántica de los agujeros negros cobra todo su interés, porque abarca escalas muy cortas, menores que la longitud de Planck.



5. LA RELACION DE DISPERSION determina la variación de la velocidad de una onda en función del inverso de su longitud de onda. El caso I caracteriza la propagación de la luz en el vacío: no hay dispersión, la velocidad de las ondas es constante, al menos hasta donde sabemos. Las ondas sonoras no conservan este comportamiento cuando su longitud de onda se asemeja a la distancia intermolecular del fluido en el que se propagan: la velocidad de las ondas mengua hasta anularse y hacerse negativa —las ondas desandan camino— (caso II) o la velocidad crece (caso III).



6. LOS FOTONES Y LOS FONONES mostrarán comportamientos parecidos en un espacio-tiempo que contenga un horizonte. Al comparar las trayectorias que adoptan muy cerca del horizonte se perciben, sin embargo, diferencias. El caso I corresponde a los fotones. Sus trayectorias se aproximan infinitamente al horizonte, lo cual da lugar a frecuencias que tienden a infinito. Los casos II y III corresponden a dos relaciones de dispersión de los fonones. Las trayectorias resultantes manifiestan que la velocidad de los fonones depende de su frecuencia y que ésta varía cuando se acercan al horizonte o se alejan del mismo. En el caso II, los fotones emitidos en la región subsónica se frenan y luego desandan el camino, cerca de la frontera. En el caso III, algunos fonones emitidos dentro de la región supersónica se aceleran en la vecindad del horizonte y consiguen franquearlo. A pesar de todo, al alejarse del horizonte, estos tres tipos de partículas adoptan las mismas trayectorias. Así, un observador lejano no podrá determinar las condiciones microscópicas de su producción cerca del horizonte, pues antes de que lleguen hasta el observador las partículas habrán "olvidado" su origen.

mucho de las propiedades de los fotones. A medida que la longitud de onda de un fonón se aproxima a la de la distancia intermolecular (del orden de unos 10^{-10} metros), sus propiedades cambian radicalmente. De manera figurada, se puede decir que el fonón se vuelve sensible al carácter granular de la materia que compone el fluido o —si se quiere— a la "granulación del espacio-tiempo" por el que viaja. La consecuencia de esta sensibilidad es que los fonones de diferentes frecuencias se propaguen a distintas velocidades.

Los físicos llaman relación de dispersión a la ley que proporciona la velocidad de una onda en función de su frecuencia o del inverso de su longitud de onda. En la naturaleza se presentan tres casos (*véase la figura 5*). El primero, que nosotros denominaremos de tipo I, caracteriza la propagación de la luz en el vacío: no existe dispersión y la velocidad de la onda es constante. Los otros dos caracterizan la propagación de los fonones. En el caso II, su velocidad disminuye con la frecuencia (hasta el punto de anularse y cambiar de signo), mientras que en el caso III su velocidad aumenta con la frecuencia. Teniendo a nuestra disposición estos tres comportamientos diferentes, se puede trazar la comparación entre los fotones de altas frecuencias en la radiación de los agujeros negros gravitacionales y los fonones de altas frecuencias en los agujeros negros acústicos. ¿Resultarán semejantes las propiedades de estas radiaciones? Dicho de otra manera,

la radiación producida por las fluctuaciones cuánticas en la vecindad de un horizonte, ¿lleva el sello de una relación de dispersión (de tipo I, II o III) que obedezcan las partículas que la constituyen?

Un olvido "milagroso"

La respuesta es que no. Lo que no deja de resultar sorprendente, pues en el momento en el que las partículas se crearon, cerca del horizonte, la dependencia de sus trayectorias respecto de la relación de dispersión era muy intensa (*véase la figura 6*). Al acercarse al horizonte la frecuencia de las partículas aumenta mucho. Si obedecen a una relación de dispersión de tipo II o III, sus velocidades variarán igualmente. Así, en el caso II, los fonones recibidos por un observador lejano se frenan conforme se acercan al horizonte, para retroceder luego. En el caso III, por el contrario, ¡provienen del otro lado del horizonte! De todos modos, en ambos casos, los fonones sufren al alejarse del horizonte un "enrojecimiento" que les devuelve al dominio de frecuencias donde la dispersión ya no se hace sentir. Recobran entonces un comportamiento parecido al de los fotones. Así, al alejarse de un agujero negro acústico, se advierte un desvanecimiento de las propiedades microscópicas de la radiación cuántica. Es razonable pensar que este desvanecimiento tiene lugar igualmente para los agujeros negros gravitacionales. Gracias a este resultado se les puede otorgar mayor confianza a las propiedades del flujo de Hawking, a pesar de que se ignora completamente la física más allá de la escala de Planck.

Aparte de este importante resultado, el examen de las trayectorias de los fonones en la vecindad del horizonte muestra que no sufren un efecto Doppler infinito, cualquiera que sea su relación de dispersión. El único caso en el que —para explicar la radiación de Hawking— hay que recurrir a partículas creadas infinitamente cerca del horizonte es el de la dispersión exactamente nula, es decir, en el caso I (*véase la figura 6*). Este comportamiento patológico corresponde a los fotones, en virtud precisamente del principio de relatividad, que estipula que su velocidad es independiente de la frecuencia. Por consiguiente, para eliminar esta patología, parece que hay que renunciar al principio de relatividad, cuando menos en la vecindad del horizonte de un agujero negro.

El éter y la gravitación cuántica

Esta última aserción puede servir de hilo conductor para intentar reconciliar la teoría de la gravitación (la relatividad general) con la mecánica cuántica. Pues hay que subrayar que —hasta el presente— los efectos de la gravedad cuántica han sido dejados de lado: si bien se ha tratado la luz de manera cuántica, se ha seguido concibiendo el campo de gravitación que caracteriza la geometría del espacio a la manera clásica. En esta aproximación, llamada "semiclásica", no se han tenido en cuenta las deformaciones que los fotones imprimen (debido a su propia energía) en el espacio-tiempo por el que viajan. Aproximación que ya no sirve para los fotones cuya energía es próxima a la escala de Planck, menos aún para los fotones cuya energía tiende a infinito, como los que se encuentran en el origen de la radiación de los agujeros negros.

Toda la experiencia de los físicos parece dar a entender que tales infinitos no se presentan en la realidad. No aparecen en las teorías sino cuando se utilizan hipótesis demasiado simplificadoras. En todos los casos que se conocen, existe un mecanismo, del que se había estado prescindiendo, que elimina el comportamiento patológico. Si nos fiamos de esta experiencia acumulada, deberemos esperar que los fotones de energías muy elevadas desaparezcan en cuanto se tengan en cuenta los efectos de la gravedad cuántica. Por consiguiente, será de rigor que el comportamiento de los fotones de alta energía difiera del de los fotones de bajas energías, correctamente descrito por la aproximación semiclásica. Este cambio de comportamiento a altas frecuencias recuerda al que presentan los fonones cuando su longitud de onda es del mismo orden de magnitud que la distancia intermolecular del fluido por el que se propagan. Todo ocurría entonces como si los fotones viajasen por un espacio-tiempo granular. La escala de esta granulación será próxima a la escala de Planck y fijará la frontera entre el comportamiento de las ondas luminosas de alta y de baja energía.

Si la teoría cuántica de la gravedad acaba por considerar el espacio-tiempo como un medio granular, la analogía entre la física del espacio-tiempo y la hidrodinámica se tornará incluso más pertinente de lo que se piensa. Lo cual constituirá un irónico vuelco de situación pues, al adoptar la relatividad restringida, Einstein había creído que desembarazaba a la física de la noción de éter, la hipotética sustancia que debía bañar todo el espacio-tiempo y cuyas vibraciones se creían responsables de la luz (en estricta analogía con las ondas sonoras). Sin embargo, al desechar el éter, se pierde la posibilidad de distinguir entre el comportamiento de las altas y las bajas energías, puesto que el principio fundamental de la relatividad (la invariabilidad de la velocidad de la luz) implica que las propiedades de los fotones sean independientes de la escala de longitud considerada. ¿Podía imaginarse Einstein que el difícil matrimonio entre la relatividad general y la mecánica cuántica conduciría a este vuelco de la situación?

En el transcurso de un congreso Solvay que constituyó un éxito para los partidarios de la mecánica cuántica, se dice que le deslizó a su amigo Paul Ehrenfest: "Sólo me río

Bibliografía complementaria

EXPERIMENTAL BLACK HOLE EVAPORATION. W. G. Unruh, en *Physical Review Letters*, vol. 46, págs. 1351-1353, 1981.

SONIC ANALOG OF BLACK HOLES AND THE EFFECT OF HIGH FRECUENCIES ON BLACK HOLE EVAPORATION. W. G. Unruh, en *Physical Review D*, volumen 51, págs. 2827-2838, 1995.

BLACK HOLE LASERS. S. Corley y T. Jacobson, en *Physical Review D*, vol. 59, págs. 124.011-124.017, 1997.

RoboCup: la copa robótica

Hiroaki Kitano y Minoru Asada



CORTESIA DE HONDA

Tras la victoria en 1997 de Deep Blue, el ordenador de IBM, contra Gary Kasparov, campeón mundial de ajedrez, la atención de los investigadores se orientó hacia un nuevo desafío: el desarrollo de robots capaces, algún día, de ganar la Copa del Mundo de fútbol. La Iniciativa para un Campeonato Robótico Mundial, o RoboCup, quiere que progresen la inteligencia artificial, la robótica y otros campos de investigación afines. Se ha propuesto un difícil objetivo: en el año 2050, un equipo de robots humanoides, totalmente autónomos, habrá de ganar un partido de fútbol contra el equipo humano que haya conseguido el campeonato del mundo, jugando de conformidad con el reglamento oficial de la FIFA.

Para ello, los robots habrán de ser capaces de caminar, correr e impulsar un balón con ambos pies, de percibir la situación en que se encuentran y de tomar por sí solos decisiones sobre las acciones inmediatas y la estrategia de juego. Habrán además de tener robustez suficiente para jugar un partido de fútbol, respetando la seguridad de los contrarios.

La técnica actual no está, ni de lejos, en condiciones de lograr un objetivo así; casi todos los robots utilizan ruedas en lugar de piernas y tienen serias dificultades en ver un balón o a otros robots. No obstante, tenemos la convicción de que el objetivo puede ser alcanzado hacia el año 2050. Desde el primer vuelo de los hermanos Wright hasta la misión *Apolo 11* que llevó un hombre a la Luna sólo pasaron 60 años. Y sólo 40 han sido necesarios desde la invención del ordenador digital hasta la primera computadora ajedrecística capaz de derrotar a un campeón del mundo humano.

Se ha seleccionado como objetivo el desarrollo de robots que jueguen al fútbol, porque su consecución comporta una serie de innovaciones que tendrían una gran importancia industrial; además, es el deporte más popular del mundo. La gama de técnicas abarca el repertorio completo de la investigación en robótica inteligente, la ciencia de los materiales y la electrónica, amén de otros avances que hoy por hoy no podemos imaginar siquiera. RoboCup no es una mera competición entre robots. Es una colaboración internacional que promueve la ciencia, la técnica y la educación. La competición anual sirve de foro de intercambio y experimentación.

Gestó la idea de la RoboCup en 1993 un grupo de investigadores japoneses, entre quienes se contaban los autores de este artículo. Mientras que el fin último es el desarrollo de robots que jueguen contra humanos, resulta práctico empezar por equipos de robots que jueguen entre sí. Decidimos, pues, organizar competiciones durante los congresos académicos. En 1995 se anunciaba la primera Copa Robótica del Mundo; se concedía a los investigadores participantes un período de dos años para la preparación de sus artilugios.

Los primeros Congresos y Juegos del Campeonato Robótico Mundial de Fútbol (RoboCup 97) se celebraron durante la Conferencia Internacional Conjunta sobre Inteligencia Artificial (IJCA-97) en la ciudad japonesa de Nagoya. En este primer encuentro participaron 35 equipos de 12 países, con unos 7000 espectadores y la presencia de más de 70 medios de comunicación de todo el planeta. La Segunda Copa Robótica del Mundo, RoboCup-98, tuvo lugar en París en 1998, durante los encuentros del campeonato humano, la Copa del Mundo de la FIFA. Sesenta equipos de veinte países participaron, con la asistencia de más de 20.000 es-

mundial de fútbol

Tras el éxito
de Deep Blue sobre
Gary Kasparov,
un campeonato
de fútbol con robots.
Y un objetivo,
ganar a los campeones
del mundo humanos
en 2050



CORTESIA DE HIROAKI KITANO





CORTESIA DE HONDA

1. TRES SORPRENDENTES IMAGENES del robot futbolista Honda Humanoid. Estos ejemplares miden 160 cm de altura y pesan 130 kilos. Arriba, a la derecha, una instantánea de la RoboCup 98 "a cuatro patas".

pectadores. La edición de 2002 se disputó en junio en Fukuoka, Japón, con 188 equipos de 29 países; acudieron 117.300 espectadores. Está previsto que la de 2003 se celebre en Padua.

En la RoboCup se afrontan las complejidades del mundo real, aunque en un entorno limitado, para contar a la vez con un problema de tamaño permisible y costos de investigación aceptables. RoboCup conduce al diseño de agentes completos, no meros módulos funcionales específicos. Para ello hay que integrar amplias áreas de la robótica inteligente: la fusión de las señales de los sensores en tiempo real, la capacidad de reacción, la adquisición de estrategias, el aprendizaje, la planificación en tiempo real, los sistemas multiagente, el reconocimiento de contextos, la visión, la adopción estratégica de decisiones, el control de la propulsión, el control robótico inteligente y muchas más. Además, la provisión de un servidor de fútbol en red, con gráficos de alta calidad tridimensionales, exige grandes avances en las técnicas de animación apropiadas para las simulaciones futbolísticas y el desarrollo de un entorno de multiusuario, interactivo y en red.





2. LOS ROBOT-PERRO DE SONY juegan partidas entre ellos en una de las categorías de RoboCup. En otra, unos pequeñs robots que se mueven sobre ruedas juegan en una mesa corriente de ping pong.

CORTESIA DE HIROAKI KITANO

Las categorías de la Robocup

El campeonato consta de varias categorías. Aparte de las ligas de robots, hay una de simulación. En ella, cada participante presenta once agentes informáticos que juegan sin intervención humana en un campo de fútbol virtual. RoboCup proporciona el simulador oficial de fútbol que dirige el desarrollo del partido. Cada jugador informático puede ver solamente una porción del campo desde la posición en que se encuentra. La percepción visual está limitada a 90 grados, y no es posible identificar los objetos distantes, aunque puedan ser vistos, como compañeros de equipo o como adversarios. Los jugadores virtuales pueden correr a máxima velocidad durante trechos cortos, pero su resistencia decae rápidamente, de ahí que no corran siempre a máxima velocidad. Es importante administrar las fuerzas durante el partido. Desde 1998 se adoptó la regla del fuera de juego; así se impulsó el perfeccionamiento de la colaboración entre agentes múltiples, necesaria para practicar la táctica del fuera de juego (adelantar a la vez los defensas). De momento se simplifica la física del simulador para que los participantes se centren en los aspectos cooperativos del juego.

En la liga de pequeños robots se juega con cinco robots por bando, cada uno de los cuales ha de tener un diámetro menor de 18 cm y una longitud que no sobrepase 15 cm. Las dimensiones del campo coinciden con las del tenis de mesa; una bola de golf hace de balón. Es lícito utilizar en el medio circundante cualquier sistema de sensores, con tal de que no entorpezca al equipo contrario. Por lo general los equipos utilizan una cámara cenital, que examina el campo desde el techo. Los programas de control reciben gracias a ella la posición de los robots "a vista de pájaro". Es permisible utilizar más de una cámara o sensores de otros tipos. La intención de la regla es que esta liga sirva de banco de pruebas para unos sistemas autónomos o semiautónomos que jueguen en un ambiente rico en sensores. Una futura aplicación típica podría ser un sistema inteligente de control de tráfico: unos vehículos semiautónomos se desplazarían por un entorno urbano, con muchas cámaras y sensores instalados por la ciudad; su movimiento se detectaría en tiempo real para su mejor control.

En la liga de robots medianos se utilizan cinco robots por equipo, de menos de 50 cm de diámetro. El campo mide nueve mesas de ping-pong, dispuestas en un cuadro de





tres por tres. En este entorno no está permitida la instalación de sensores fijos: todos los sistemas sensoriales necesarios han de ir a bordo de los robots. Esta norma se propone estimular la investigación de sistemas plenamente autónomos, capaces de reconocer y actuar por sí solos, robots capaces de actuar en lugares a los que los operadores no tengan acceso y donde no puedan actuar por control remoto.

En las ligas de robots pequeños o medianos unas vallas circundan todo el campo. Con la técnica actual no resulta posible un juego razonable donde la pelota no salga del campo de juego. Sin embargo, en un futuro cercano se retirarán las vallas y los robots habrán de moverse rápidamente para mantener la pelota en juego.

Tras los partidos de exhibición de la RoboCup 98 de París, la liga de robots con patas se reconoció como liga oficial, patrocinada por Sony. En la actualidad se juega con unos robots que recuerdan a perros fabricados por esa firma. Disponen de 15 grados de libertad; llevan a bordo todos los sistemas sensoriales y computacionales. Cada equipo consta de tres de tales robots.

La liga más difícil de la RoboCup, la que conducirá directamente al fin último de la iniciativa, es la de robots bípedos, humanoides. Desde el éxito conseguido por Honda en 1997 con sus androides, diversas empresas e instituciones de investigación se han implicado seriamente en el desarrollo de humanoides de diversos tamaños. De momento no se disputan partidos en que se enfrenten esos artilugios. Se limitan a chutar a puerta y a efectuar ejercicios de marcha y "libres". En Fukuoka participaron robots de diferentes alturas, 40 cm, 80 cm, 120 cm o, como el robot sueco Priscilla, de tamaño natural. La categoría libre la ganó el más pequeño de los concursantes, el danés Southern Denmark, de 25 cm. Se concedió el premio al mejor robot en conjunto a Nagara, japonés, de 83 cm.

Visión y fusión de sensores

La información visual proporciona el mayor caudal de información, no sólo para percibir el mundo exterior, sino también los efectos de las acciones de los robots. Los investigadores en visión computarizada han buscado la reconstrucción de la geometría tridimensional a partir de información visual bidimensional, en la convicción de que la geometría espacial constituye la representación más potente y general, la que habría de utilizarse en muchas aplicaciones. La reconstrucción tridimensional, lenta y computacionalmente costosa, podría, sin embargo, no ser necesaria ni óptima en el caso de la tarea propuesta al jugador de RoboCup.

Para habérselas con los rápidos movimientos de los robots adversarios y del balón, los sistemas de visión que se instalan a bordo de un robot que a su vez se mueve deprisa han de poder procesar imágenes en tiempo real. No ha de construirse un sistema de visión especializado, sino un sistema de visión integrado en un sistema complejo que interactúa de formas específicas con el mundo, un sistema que está incardinado en el cuerpo y las tareas del robot.

No sólo plantean problemas los aspectos computacionales del sistema de visión, sino también los materiales. Las cámaras basadas en dispositivos de acoplamiento de carga (CCD) corrientes, aptas para tomar fotos o películas, no tienen por qué ser las adecuadas para dotar de percepción a los robots. Por ejemplo, los sistemas ópticos de la mayoría de las cámaras CCD tienen un ángulo de visión de 35 grados, demasiado estrecho para un robot móvil. Es necesario un ángulo de visión de mayor amplitud, manteniendo, sin embargo, una elevada resolución en la zona foveal. Los equipos que participaron en RoboCup 97 tropezaron con problemas serios al utilizar como sistema óptico una cámara CCD de serie, con montaje fijo frontal. La mayoría de los participantes en la RoboCup 98 utilizaron lentes de tipo gran angular o cámaras con montaje móvil, con las que el robot podía percibir el entorno sin mover el cuerpo y observar una zona más ancha. Por la misma razón, un sistema muy apreciado de cámara es el de visión omnidireccional, que utiliza un espejo hiperbólico instalado sobre una cámara orientada hacia arriba. Este sistema permite al robot ver 360 grados a la vez, con el inconveniente de la pérdida de resolución en zonas específicas. Tal sistema no es adecuado para los jugadores delanteros, pero lo lleva el robot guardameta de muchos equipos.

Además de visión, el jugador de RoboCup puede necesitar otros sentidos, ofrecidos por un sonar, un sistema de tacto o sensores





de fuerza/par, que discriminen las situaciones que no cabe analizar contando sólo con la información visual. Una situación de bloqueo típica en la RoboCup consistía en que dos robots chocasen uno contra otro de forma tal, que ninguna de las cámaras de los robots alcanzase a ver al aparato con el que había chocado. En esta situación, el robot que responda tan sólo en función de la información visual será incapaz de detectar que algo está tocando su cuerpo y estorbando su movimiento; la cámara no observará ningún obstáculo. Es de importancia crítica que los robots estén equipados con sensores de diversos tipos, para que puedan comprender con exactitud la situación en que se encuentran. El jugador de RoboCup ha de ser capaz de efectuar en tiempo real el procesamiento de la integración multisensorial.

Los autores

HIROAKI KITANO y MINORU ASADA son el presidente y uno de los vicepresidentes, respectivamente, de la Federación internacional de Robocup, competición en la que además participan con sus robots. Kitano dirige el Proyecto de Sistemas Simbióticos ERATO Kitano, patrocinado por el gobierno japonés. Asada es profesor de sistemas adaptativos de la universidad de Osaka.

Aprendizaje

Para tener éxito en la RoboCup, cada jugador tiene que aprender las destrezas pertinentes, el equipo a trabajar como tal y el entrenador (un programa de entrenamiento) deberá mejorar su dirección del equipo.

Entre las destrezas individuales de los jugadores se cuentan, por una parte, capacidades básicas, como las de chutar y pasar el balón, y, por otra, saber a cuál de ellas deben recurrir en cada situación. El trabajo en equipo se divide también en dos categorías: el trabajo local, como los pases de balón entre jugadores, y el global, es decir, la estrategia. En la actualidad, la liga de robots reales se centra sobre todo en las destrezas individuales de los jugadores, mientras que en la de robots virtuales ("softbots") priman los problemas del trabajo en equipo. Además de estos niveles de aprendizaje, la enseñanza constituye otro importante tema de investigación, con un amplio abanico de posibilidades, directas e indirectas.

El paso del aprendizaje individual al aprendizaje del trabajo en equipo es un problema de investigación nuevo. El aprendizaje ha de realizarse antes de los partidos, durante cada partido y después de los partidos. Antes de la competición, los jugadores pueden dedicar tanto tiempo como deseen a aprender habilidades. Sin embargo, si un equipo pretende adaptarse a la estrategia del oponente, tendrá que aprender durante el partido mismo; deberá hacerlo en 5 o 10 minutos. Lo que de nuevo se haya aprendido en ese partido debería ser aplicable en lo sucesivo, sea contra el mismo adversario o contra otros. Además, quizá haya que modificar la estrategia si alguno de los jugadores, propio o contrario, se estropea y no puede continuar en el partido; el sistema ha de poder, pues, aprender a detectar anomalías y determinar los cambios que debe aplicar en su estrategia.

La RoboCup propiamente dicha sólo aborda partidos de fútbol, pero aun así plantea muchas dificultades de aprendizaje que la forma ingenua en que se usan las actuales teorías pertinentes es incapaz de resolver. No se ha efectuado en el pasado una investigación sistemática de las variaciones y limitaciones impuestas al aprendizaje por situaciones diversas. Una investigación concienzuda de todas las facetas del aprendizaje podría suponer un primer paso hacia la consecución de agentes verdaderamente autónomos.

Incluso una sola de estas facetas plantea muchas cuestiones de interés para el investigador. Uno de los autores, Asada, enseña a los robots cómo han de maniobrar ante la portería. Recurre a una metodología de refuerzo; no programa explícitamente de qué forma han de comportarse durante el partido. Un descubrimiento interesante es que el robot no llegará a aprender bien si se encuentra, desde el principio, con porteros muy hábiles. El robot





aprende mejor cuando se entrena con una portería vacía, después con un portero estático, luego con un portero de movimientos lentos y por último con un portero con reflejos. Para el robot aprendiz es de importancia capital que la tarea se vaya complicando poco a poco, en lugar de enfrentarse ya desde el principio a la tarea de máxima dificultad. Cuando el portero es tan diestro que el jugador no consigue marcar ni un solo tanto, en su aprendizaje no hay refuerzo. Todos los intentos son considerados fracasos. Se crea así una situación en la que no hay nada que aprender.

3. EL EQUIPO de agentes informáticos ideado por Sean Luke aprendió a jugar gradualmente. Al principio se quedaban quietos, sin reaccionar (*a*). Tras los primeros partidos, corrían tras el balón, como niños (*b*). Sólo tras unos centenares de simulaciones empezaron a distribuirse por el campo (*c*). Por último, algunos elementos se dispusieron espontáneamente a defender la portería (*d*), sin que se hubiese preprogramado el papel de portero.

Formación evolutiva de equipos de fútbol

¿Podremos llegar a formar, evolutivamente, un equipo de jugadores virtuales que juegue tan bien como los programados por expertos humanos? La pregunta ha sido afirmativamente respondida por Sean Luke, de la Universidad de Maryland. Luke ha desarrollado un equipo para la liga de simuladores que evolucionó durante meses en un superordenador del centro de cálculo avanzado de su universidad; este equipo virtual venció a varios equipos programados por seres humanos y pasó la fase preliminar de la RoboCup.

Genetic Program (Programa Genético) es uno de los métodos evolutivos utilizados en una amplia gama de aplicaciones. La metodología evolutiva está mereciendo atención creciente por su capacidad para deducir automáticamente soluciones aceptables sin necesidad de un conocimiento profundo del problema. No obstante, se utiliza sobre todo para la optimización de parámetros en casos simples; no había sido ensayada a fondo en un dominio dinámico, como el de la RoboCup.

Cuando Luke dio comienzo a su proyecto, fueron muchos quienes dudaron que el método evolutivo pudiera engendrar programas que resultasen competitivos en la RoboCup. El programa de Luke empezaba generando códigos aleatorios para el control de los jugadores. Al principio, claro está, no funcionaban. Ni siquiera detectaban la pelota; los jugadores permanecían inmóviles en sus posiciones iniciales. Hasta que, por accidente, algún jugador se dirigía hacia la pelota y la impulsaba hacia la portería contraria; tal vez, con suerte, marcase un gol. A ese programa generado se le consideraba más apto y se le otorgaban mayores oportunidades de crear descendencia. Al cabo de varios cientos de generaciones, la población estaba formada por programas que corrían ingenuamente tras la pelota: como los niños, que quieren todos tocar el balón. Al cabo de cierto tiempo, algún programa aprende por casualidad que conviene mantener jugadores delante de la portería, para defenderla. Es un paso notable: el programa generador no incluía ningún papel de guardameta o de defensa; sin embargo, por evolución, acabaron por surgir esas especializaciones. Más tarde aparecen estrategias más refinadas, como las de aprovechar los huecos y las bandas. La conducta mientras se posee la pelota se estabilizó pronto; la parte más ardua fue la actuación de los jugadores alejados de la pelota. Ese es también el aspecto más difícil en los equipos de fútbol humanos.

Juego de equipo

En fútbol, el trabajo en equipo es importante. En años recientes ha ido adquiriendo cada vez mayor peso la investigación y diseño de agentes autónomos capaces de mostrar comportamientos cooperativos. No existe, empero, un procedimiento establecido; los investigadores están experimentando diversos métodos en la RoboCup.

El método seguido por la Universidad Carnegie-Mellon, una de las vencedoras en las ligas de robots pequeños y de jugadores simulados, asigna inicialmente un puesto a cada jugador: defensa, centrocampista, delantero izquierdo o volante derecho. Es frecuente, sin embargo, que en el desarrollo del partido sus posiciones cambien, debido a la naturaleza dinámica del juego, y que un centrocampista tenga que hacer las funciones de delantero o de defensa. Con este método cada jugador tiene la capacidad de desempeñar el cometido de otros, pero en cuanto la situación queda resuelta, todos retornan a sus posiciones originales.

Un equipo del Instituto de Informática de la Universidad del Sur de California se vale de Soar, una arquitectura cognoscitiva célebre en el campo de la inteligencia artificial, para crear "operadores de equipo". En lugar de asignar a cada jugador la ejecución de un plan específico, se valen de un operador que se aplica a dos o tres jugadores que forman grupo, los delanteros, por ejemplo, o los defensas. A un grupo de jugadores se le despacha un operador (del estilo de "Ataque por la derecha"), y cada uno de los jugadores, basándose en su posición actual, interpretará y ejecutará su papel dentro de la operación encomendada.

Estas investigaciones se refieren a la formación básica de equipo. Hay también problemas relativos a la solidez del juego de equipo. Cuando alguno de los jugadores del equipo resulta lesionado, alguien ha de ocupar su puesto, o bien el equipo habrá de modificar su estrategia general para que el daño no provoque incoherencias catastróficas en el equipo. Para ello, cada jugador ha de reconocer anomalías en otros jugadores, evaluar la situación, replanificar dinámicamente la estrategia y generar un nuevo plan de trabajo colectivo. Los progresos en cualquiera de estos campos serían muy beneficiosos para la inteligencia artificial y la robótica de colectivos móviles.



Diseño mecánico

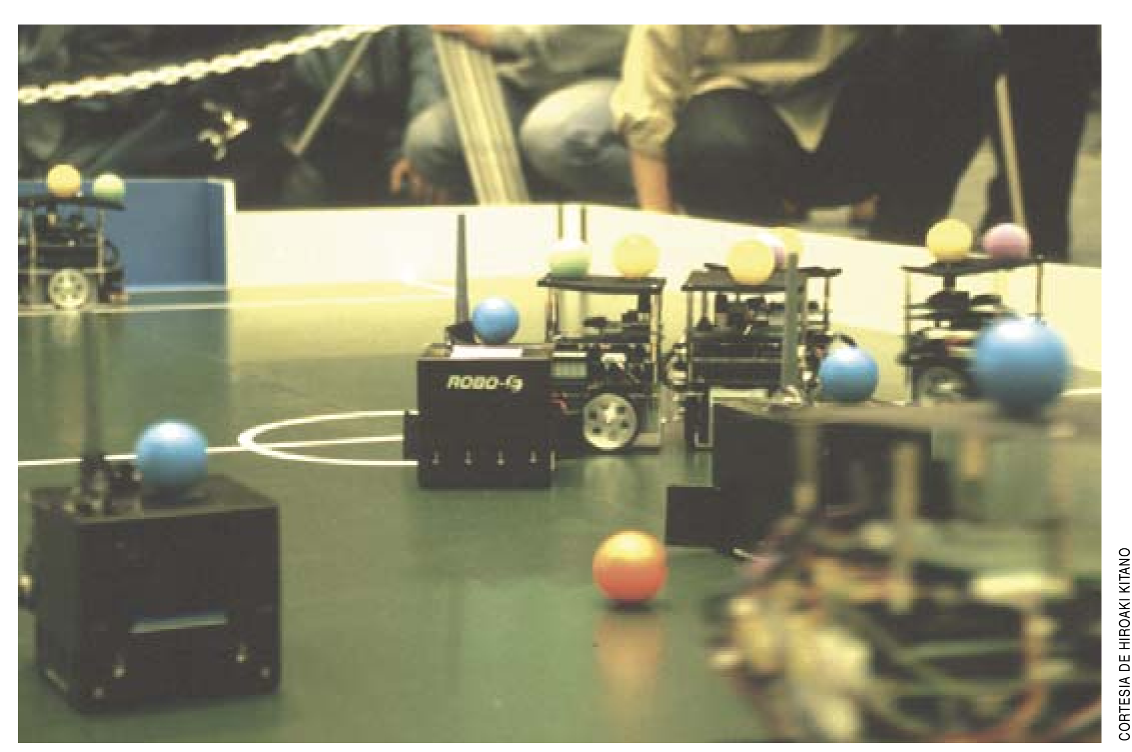
Incluso en la categoría de robots rodantes existe un gran número de diseños mecánicos distintos, que ambicionan, sobre todo, mejorar la maniobrabilidad. Un equipo colectivo, centrado en torno a investigadores del Instituto de Investigaciones Físicas y Químicas (RIKEN) japonés, ha desarrollado refinados mecanismos omnidireccionales. En los robots ordinarios con ruedas se utilizan, bien ruedas guía, bien sistemas de tracción diferencial, en los cuales la diferente rotación de dos ruedas cambia la dirección del robot. El mecanismo de rodadura omnidireccional consta de cuatro ruedas, cada una de las cuales se puede levantar con independencia de las otras; de esa forma la combinación de ruedas puede generar empuje en la dirección deseada.

El Real Instituto de Tecnología de Melbourne presentó un robot omnidireccional que se mueve sobre dos bolas accionadas por un par de ejes dispuestos perpendicularmente. Estas esferas giran en cualquier dirección, dependiendo de la diferencia de rotación de los ejes. Al disponer de dos esferas así, el robot puede desplazarse en cualquier dirección sin que gire el cuerpo.

En la liga de robots pequeños, un equipo de ingenieros japoneses sacó un robot de dimensiones mínimas, muy perfeccionado. Está dotado de un sistema de dirección omnidireccional con tracción asíncrona a las cuatro ruedas que permite que éstas cambien de dirección de forma independiente. Lleva incorporadas dos cámaras, montadas en sistemas orientables en todas direcciones, con procesado de visión a bordo. El equipo entero está implantado en un robot de 5 cm por 10 cm, que funcionó perfectamente.

Los robots actuales se valen para desplazarse de motores y engranajes, demasiado frágiles e ineficientes. Se trata de sistemas seriales de transmisión, en los cuales la avería o el funcionamiento deficiente de uno cualquiera de los componentes merma el funcionamiento del sistema. Además, los motores con potencia suficiente son grandes y pesados. En cambio, la musculatura humana es un sistema muy elegante, de alta potencia y eficacia, muy robusto gracias a que está formado por fibras paralelas, ligero y compacto.





CORTESIA DE HIROAKI KITANO

4. LOS PARTIDOS DE LA ROBOCUP se juegan ante un público que llena las salas donde se disputan; en este caso, se trata de un encuentro de robots de tamaño medio (*izquierda*). Moverse efectuando rápidos cambios de dirección sigue siendo un problema no resuelto. Aquí arriba se ve una situación de un partido de la categoría de robots pequeños.

Los robots jugadores de fútbol han de ser capaces de correr y de saltar. No es factible que los sistemas actuales, con sus motores y engranajes, impulsen correctamente al robot y hagan que corra y salte. Habrá que desarrollar algún método de impulsión radicalmente distinto, un "sistema de musculatura artificial", que quizá se asemeje a los músculos auténticos, se contraiga y relaje sin gran consumo de energía y pueda alojarse en un espacio angosto. El impacto industrial de la musculatura artificial sería tan enorme, que modificaría prácticamente el diseño de toda clase de productos industriales.

Arquitectura de agentes

La arquitectura de agentes, un armazón sobre el que se organizan la percepción y la selección de acciones de cada jugador, es cimiento del diseño de todo un sistema. En el pasado, casi todos los sistemas robóticos o de inteligencia artificial han sido concebidos para una sola tarea. Los jugadores de RoboCup deben afrontar múltiples subtareas: chutar (incluido a gran distancia), esquivar a un contrario o cargar sobre él, pasar la pelota, cabecearla y lanzarla con las manos; estas destrezas comparten a menudo una conducta común: evitar a los adversarios.

Hablando a grandes rasgos, hay dos formas de construir un jugador de RoboCup. Una consiste en diseñar componentes especializados en una sola tarea y ensamblarlos luego entre sí. La otra consiste en diseñar uno o dos componentes que aborden múltiples subtareas. Esta segunda constituye hoy un campo de investigación abierto y de gran importancia.

Está, por otra parte, el problema de combinar los métodos reactivo y deliberativo. Para reaccionar rápidamente frente a la pelota y moverse por el campo es eficaz un enfoque reactivo. Por otra parte, los jugadores han de contar con estrategias globales, además de con tácticas locales, y no se obtienen con sistemas meramente reactivos. Asimismo, un enfoque deliberativo, que comporta planificación y razonamiento, puede resultar demasiado lento cuando hay que reaccionar ante una pelota que se mueve deprisa y afrontar un ambiente dinámicamente variable. La arquitectura de agentes de los jugadores de RoboCup ha de ocuparse de la combinación de tales métodos.

RoboCup Rescate

Debido al amplio abanico de técnicas necesario, y a las características del fútbol, cabe imaginar diversas aplicaciones futuras valiosas social y económicamente: sistemas inteligentes de tráfico, robots de rescate, robots ofimáticos y domésticos, robots de ayuda a personas discapacitadas o robots para trabajos peligrosos. Al objeto de facilitar la fluida transferencia de técnicas desde el campo de fútbol a las aplicaciones del mundo real, así como para atender a funciones inexistentes en el fútbol, nació una derivación de la RoboCup, dedicada a las tareas de búsqueda y rescate en grandes desastres.

Imaginemos que Los Angeles o Tokio sufren un fuerte terremoto. Las lecciones de Kobe y de otros



5. UN ROBOT DE RESCATE junto a unos derribos simulados parte del recorrido de pruebas entre ruinas urbanas para robots construido por el Instituto Nacional de Pesas y Medidas estadounidense. Los artilugios que participan en RoboCup Rescate se enfrentan a situaciones semejantes.

desastres indican que para poder desplegar robots autónomos en las tareas de rescate será preciso crear sistemas muy robustos y de gran inteligencia. Las características de una misión de rescate coinciden en muchos aspectos con las del fútbol, pero exigen también otras muchas destrezas que no cuentan en este juego. En las grandes catástrofes sólo se dispone de información incompleta, en gran parte falsa. Conforme va evolucionando la situación, será mayor la información disponible, pero aun así gran parte de ella seguirá siendo incorrecta. El terreno es hostil y dinámico. En los niveles de mando resulta necesario establecer rápidamente estrategias de despliegue, que habrán de ser modificadas según se desarrolle la situación. En este dominio, la logística constituye una preocupación dominante, lo que no ocurre en el fútbol.

Una vez desplegados los equipos de robots, es muy probable que algunos se averíen, por lo que será necesario reorganizar en tiempo real la estrategia del equipo. Para la búsqueda y rescate de las víctimas los robots han de trabajar cooperativamente. Ya en el lugar, personas y robots habrán de utilizar multitud de sensores, entre ellos cámaras CCD, de infrarrojos, sonares y micrófonos, con el fin de dar con las víctimas de la forma más rápida y segura. Una vez localizadas, los robots han de actuar cooperativamente para extraerlas de los escombros. Por ejemplo, uno de los robots podría levantar una pared caída, mientras otros encuentran a las víctimas sepultadas bajo el edificio desplomado. Más robots rescatarán entonces a las víctimas descubiertas. Todo esto exige altos grados de trabajo en equipo. Después hay que trasladar a las víctimas a centros de atención, lo que exige el bloqueo anticipado de ciertas vías, reservadas a las operaciones logísticas y el traslado de heridos. Hay, además, otros muchos problemas que resolver, que pueden servir también como campo ideal de investigación de los sistemas multiagente y en robótica.

RoboCup Rescate empezó a celebrarse en la Robocup de Seattle, en 2001; se divide en dos categorías: la simulación informática de estrategias de rescate para grandes catástrofes y el empleo de robots reales, aptos para operar cooperativamente con otros robots y con seres humanos en la búsqueda y el rescate de las víctimas bajo unos escombros.

La RoboCup Rescate de simulación remeda diversas misiones de rescate y evalúa de qué forma puede un grupo de agentes llevar a cabo tales tareas. Ensaya también en qué medida dos grupos de agentes, que se encuentran por primera vez, logran establecer una relación cooperativa.

En la categoría de robots reales, RoboCup Rescate se centra en la búsqueda de víctimas. Se parte del supuesto de que debajo de unos escombros, dispuestos al efecto, hay personas. Los escombros quizá sean frágiles y cueste abrirse paso entre ellos. Unos robots especiales, provistos de diversos sensores, han de cubrir la zona y localizar las víctimas de manera eficaz y completa. En Fukuoka venció un equipo de Irán, Kavosh. El simulacro de campo de ruinas, con varios ámbitos distintos, estaba situado en el aparcamiento del estadio de Fukuoka. En la versión virtual también ganó un concursante iraní, Arian.

Robocup no sólo se ha ampliado con esta rama. Al abarcar tantos aspectos, es un tema ideal para las clases de robótica y de inteligencia artificial. Existen cursos universitarios y postuniversitarios basados en RoboCup, que además incluye ahora un campeonato pedagógico, RoboCup Junior, que refleja las necesidades de las instituciones de enseñanza. En la RoboCup Junior se utilizan robots más baratos y la competición requiere el cumplimiento de tareas mucho más sencillas, en cualquiera de las categorías de que consta (fútbol de uno contra uno y de dos contra dos, y baile).

Bibliografía complementaria

ROBOCUP: CHALLENGE AI PROBLEM. H. Kitano, en *AI Magazine*, AAAI, marzo 1997.

ROBOCUP-97: ROBOT SOCCER WORLD CUP I. Dirigido por H. Kitano; Springer-Verlag, 1998.

ROBOCUP-98: ROBOT SOCCER WORLD CUP II. Dirigido por M. Asada y H. Kitano; Springer-Verlag, 1999.

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Depresión bajo el casco

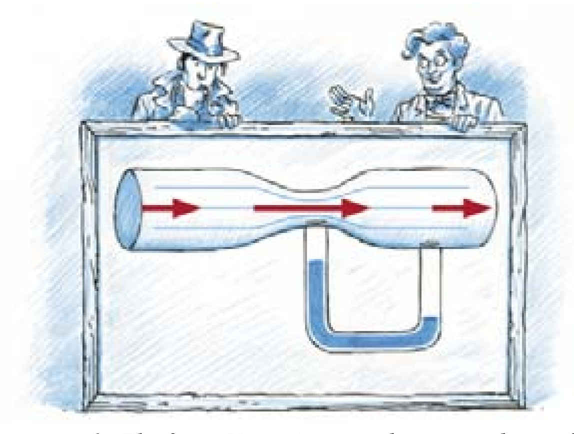
Cuando en 1992 el *Queen Elizabeth II* encalló en Vineyard Sound (el estrecho del Viñedo), a la altura de Nueva Inglaterra, los marinos locales se asombraron: el mayor transatlántico del mundo navegaba en aguas bastante profundas. Una indagación rápida sugirió un culpable que no actuaba por primera vez: no sólo habían embarrancado por su culpa pontones en la Gironda, el estuario del Garona, sino que, en los años sesenta, había llevado a naufragar a tres buques en los Grandes Lagos americanos. ¡Demasiado! Se hizo pública una pesquisa internacional que confirmó la culpabilidad del... efecto Venturi, fenómeno físico conocido desde hace dos siglos. Nuestro investigador ha retomado el expediente.

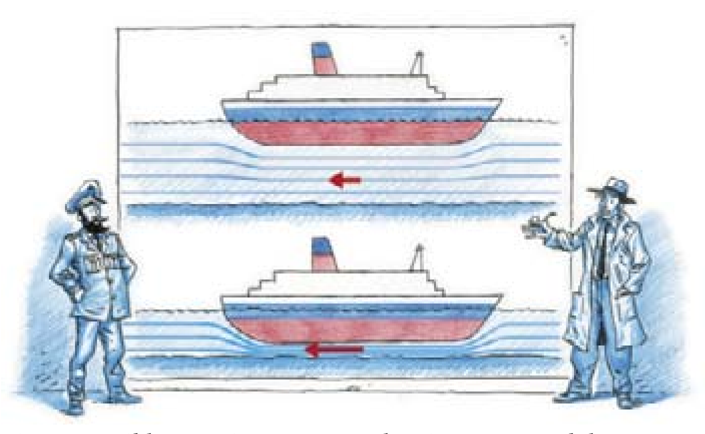
Los marinos conocen el efecto Venturi bajo los barcos y lo llaman "rehundimiento". Nuestro investigador ignoraba el mecanismo, así que estudió las diferentes formas, cinética y potencial, de la energía mecánica en los fluidos. Cuando el agua cae, la energía potencial debida a la altura a la que se encontraban las masas de agua se transforma progresivamente en energía cinética. Arriba, la energía potencial del agua es máxima mientras que su energía cinética y su velocidad son pequeñas; abajo, es al revés. Esa transformación de la energía potencial en energía cinética se aprovecha a orillas de los ríos para recuperar energía en las ruedas de las norias.

Sin embargo, esa técnica es poco eficiente, pues las masas de agua caen en cascada y se dispersan inútilmente. En las centrales hidroeléctricas modernas, la energía potencial debida a la altura se transforma en otra forma de energía ligada a la presión. Para ello, el agua se introduce en un conducto forzado que la guía hacia una turbina situada mucho más abajo. El caudal de agua que atraviesa una sección cualquiera de esa canalización es constante; si la sección no varía a lo largo del conducto, la velocidad del agua (o sea, el caudal dividido por la sección) es la misma de arriba abajo. En ese caso, la energía cinética del fluido permanece constante durante el descenso. En cambio, la presión aumenta con el desnivel y llega al máximo en el punto más bajo del conducto. Así, despreciando los rozamientos, el líquido a baja presión en lo alto del conducto se transforma en un fluido a presión que más abajo mueve una turbina.

Una energía local

Estudiando estos ejemplos, el investigador se dio cuenta de que, en un fluido, la presión puntual constituye una forma de energía "local". ¿Cómo participa en los intercambios de energía dentro del fluido esa energía ligada a la presión? Para saberlo, el investigador consultó a un físico, quien le habló de Daniel Bernoulli. En 1734, el suizo resolvió la cuestión expresando la conservación de la energía en el seno de un fluido incompresible que corre sin rozamientos ni remolinos. La ecuación de Bernoulli estipula que la suma de las energías cinética y potencial de un elemento de fluido, multiplicada por el producto del volumen de ese elemento por la presión que reina en su seno, es una magnitud conservativa. Ahora bien, cuando un fluido baja por una pendiente a través de un estrechamiento, por ejemplo, se modifican las velocidades y las altitudes de los elementos de volumen que lo constituyen. De ese modo, en cada elemento de volumen tiene lugar una transferencia entre la energía potencial, la energía cinética y la energía ligada a la presión. En otras palabras, si en un lugar se acelera





BRUNO VACARO

1. El efecto Venturi se produce cuando un fluido incompresible atraviesa un estrechamiento: a caudal constante, la velocidad aumenta en el estrechamiento y la presión baja (izquierda). *Ese efecto disminuye la presión bajo la carena de los barcos y los "rehunde"* (derecha). *El fenómeno es un gran peligro para los buques de gran tonelaje cuando pasan por bajíos*

o desacelera la corriente fluida, en ese lugar la presión disminuye o aumenta.

Cuando la energía potencial gravitatoria es casi constante, la ecuación de Bernoulli relaciona directamente la diferencia de presión entre dos puntos del fluido con la variación de energía cinética entre esos dos mismos puntos. Esa diferencia de presión es proporcional al cuadrado de la velocidad. Entonces, la presión en un punto de un fluido es tanto menor cuanto mayor es la velocidad de la corriente. Cuando se acelera un fluido, disminuye la presión allá donde aumenta la velocidad de la corriente. Este fenómeno, el efecto Venturi, lleva el nombre del físico italiano Giovanni Battista Venturi, que lo estudió a fondo a fines del siglo XVIII. Se utiliza por ejemplo en las trompas de agua de los laboratorios de química. Para bombear, se aprovecha la aspiración inducida por el efecto Venturi al nivel del estrechamiento de un tubo recorrido por agua.

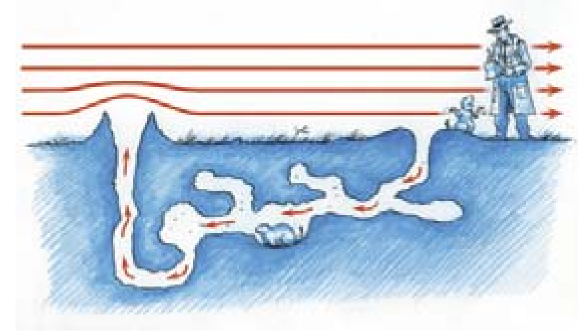
El físico consultado ilustró sus palabras con el caso del "ruido arterial". Un depósito de grasa reduce la sección de una arteria. La sangre se acelera a la altura de la constricción; ahí disminuye la presión sanguínea. Cuando una arteria está medio taponada, la velocidad de la sangre es doble; es corriente que pase de uno a dos metros por segundo. Esa variación reduce la presión a la altura de la constricción del orden de 1600 pascal, o sea, 12 milímetros de mercurio. Tal bajada de presión anula a veces la sobrepresión que dilata las arterias (¡que deben permanecer dilatadas!). En algunos casos extremos, la presión exterior supera a la arterial y la arteria se pinza. Al no pasar sangre, la presión sanguínea aumenta, lo que acaba provocando la reapertura de la arteria; ésta vuelve a pinzarse en cuanto la sangre circula a gran velocidad, etc. Esa sucesión de cierres y aperturas de la arteria produce una palpitación característica, que los médicos identifican con ayuda del estetoscopio.

Efecto Venturi al aire libre

Inquieto, el investigador escuchaba. El físico le explicó que si quería resolver su problema, primero le era necesario entender las técnicas de aireación de... los perrillos de las praderas. Algo desconcertado, nuestro investigador se dirigió a las praderas norteamericanas al encuentro de esos primos de las ardillas. Mañosos ingenieros, los perrillos de las praderas ventilan sus madrigueras gracias al efecto Venturi. Para ello construyen dos tipos de entradas, unas altas en forma de cráter, otras bajas en forma de cúpula. ¿Por qué? A cierta altura, la velocidad del viento es la misma en toda la planicie. Cerca del suelo, las masas de aire se aceleran para contornear los obstáculos que encuentran. La velocidad del aire es mayor sobre los cráteres que sobre las cúpulas, la presión un poco menor encima de aquéllos que de éstas. Esta diferencia genera una corriente de aire en las galerías de la madriguera que aporta a sus habitantes el oxígeno vital.

Las madrigueras de los perrillos de las praderas están inmersas en la corriente de aire al igual que los cascos de los buques lo están en la corriente marina. En este segundo caso, hace de viento de la pradera la corriente de agua, bajo el casco, resultante del avance del navío. Como les ocurre a las capas de viento en torno a la entrada a las madrigueras, la velocidad del agua aumenta a lo largo de las líneas de corriente para contornear la carena por los costados y por debajo. Así, bajo el casco, la presión es tanto menor cuanto mayor sea la velocidad de la corriente. Ahora bien, la altura sumergida de un barco es aquella para la cual la resultante de las fuerzas de presión sobre la carena equilibra al peso. Si bajo el casco la presión disminuye, el buque se hunde, se "rehunde" como dicen los marinos. Si en aguas profundas el fenómeno sólo aumenta levemente el calado, la cosa es muy distinta en los bajíos y canales. En estos lugares, el "claro bajo quilla", la distancia entre la carena y el fondo, se reduce. Las aguas disponen de poco espacio para contornear la carena y se aceleran aún más. El fenómeno se amplifica cuando el navío surca las olas a toda marcha.

Nuestro investigador podía ya reconstruir la manera en que embarrancó el *Queen Elizabeth II*. La ecuación de Bernoulli indica que



2. Para airear sus madrigueras, los perrillos de las praderas construyen entradas en forma de cráter. Al contornear ese obstáculo, el viento se acelera, de modo que la presión disminuye justo sobre el orificio, creándose así una succión que fuerza la ventilación de la madriguera

el rehundimiento aumenta con el cuadrado de la velocidad del barco; es un efecto intenso, pues. Pero, ¿cómo calcularlo cuando no se domina el conjunto de los parámetros que influyen en la velocidad del agua bajo el casco: claro bajo quilla (variable), perfiles de carena (complicados), turbulencias, rozamientos? Pragmáticos, los marinos emplean hoy fórmulas empíricas. Puestas a punto en los años setenta, se confirmaron luego gracias a medidas precisas de posicionamiento por GPS.

Aplicando esas fórmulas a las 66.000 toneladas del *Queen Elizabeth II* y a sus 10 metros de calado (eslora 294 metros, manga 32 metros), nuestro investigador obtuvo algunos órdenes de magnitud impresionantes. El primero corresponde a cuando el buque navega a 5 nudos (10 kilómetros por hora) en aguas extensas de profundidad menor que 14 metros: el rehundimiento es entonces de sólo 10 centímetros. Sin embargo, llega a 50 centímetros cuando el navío avanza a 10 nudos y a 2,2 metros cuando navega a 20 nudos. Al embarrancar, el *Queen Elizabeth II* marchaba a 25 nudos, lo que pudo aumentar su calado en unos 3,5 metros. Si su claro bajo quilla sólo era entonces de 3 o 4 metros, el accidente estaba cantado. En los estrechos, canales y pasos, a fin de evitar el rehundimiento, la velocidad de los grandes buques está limitada por reglamento. El piloto no podía ignorar a qué velocidad máxima podía avanzar el gran trasatlántico por el Vineyard Sound. No obstante, el capitán lanzó su navío a 25 nudos.

BRUNO VACARO

Juan M. R. Parrondo

Paradojas y atascos de tráfico

En una ciudad, el barrio residencial A está conectado con el barrio de oficinas B por dos carreteras, como se muestra en la figura 1. Cada mañana, mil coches se dirigen de A a B; cada conductor elige uno de los dos posibles caminos tratando de llegar a su destino en el menor tiempo posible.

Los coches tardan en recorrer los tramos AD y CB 15 minutos. En los tramos AC y DB hay puentes en los que la carretera se estrecha. Como consecuencia, el tráfico es más lento cuantos más coches atraviesan los puentes. Supongamos que los coches tardan $F_{AC}/100$ minutos en recorrer el trayecto AC, siendo F_{AC} el número de coches que esa mañana atraviesan el puente. De la misma forma, se tarda $F_{BD}/100$ minutos en recorrer el trayecto BD, siendo F_{BD} el número de coches que esa mañana atraviesan el puente situado entre B y D. Por ejemplo, si todos los coches deciden ir de A a B por el trayecto ACB, tardarán 1000/100 = 10 minutos en ir de A a B, más 15 minutos en ir de C a B. El viaje completo durará 25 minutos. Por supuesto, los conductores avispados al día siguiente elegirán el trayecto ADB. Si, por ejemplo, sólo 100 toman ese trayecto, tardarán 15 + 100/100 = 16 minutos en llegar a su trabajo, mientras que los que insisten en el trayecto ACB tardarán 15 + 900/100 = 21 minutos.

Está claro que si uno de los dos trayectos es más rápido que el otro, los conductores tenderán a elegirlo en días posteriores. Pero con ello harán que sea más lento. Se llegará a un equilibrio si los tiempos en cada trayecto son iguales, de modo que para nadie suponga una ventaja cambiar su trayecto cotidiano. Este equilibrio coincide con el llamado *equilibrio de Nash* cuando el problema de escoger el trayecto se interpreta como un problema de teoría de juegos: no hay cambio de estrategia individual que permita que jugador alguno aumente su ganancia.

En el caso de nuestra red viaria, el equilibrio se consigue si:

$$T_{ACB} = T_{ABD} \Rightarrow \frac{F_{AC}}{100} + 15 = 15 + \frac{F_{DB}}{100}$$

lo que implica inmediatamente que el mismo número de coches atraviesa los dos puentes cada mañana. Por tanto, en el estado de equilibrio 500 conductores elegirán el trayecto ACB y otros 500 el trayecto ADB, y el tiempo que invertirán todos ellos en su viaje al trabajo será:

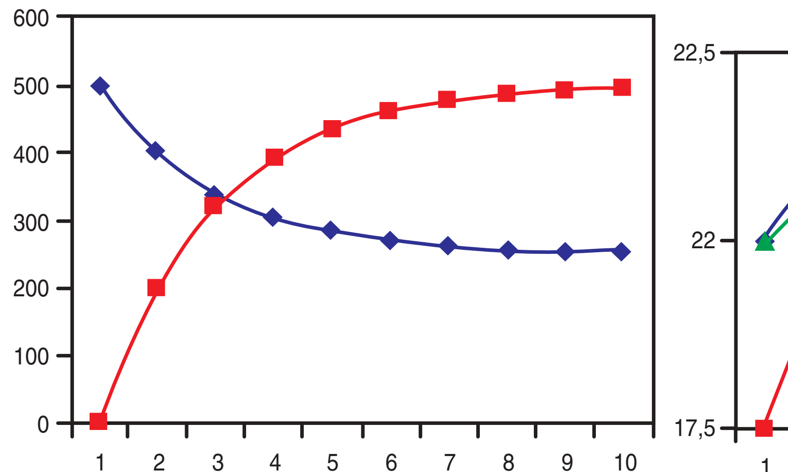
$$T_{ACB} = T_{ABD} = \frac{500}{100} + 15 = 20 \text{ minutos}$$

Unos meses antes de las elecciones, el alcalde decide invertir algo del presupuesto municipal en mejorar la red viaria; se proyecta una carretera de un único sentido que una los puntos C y D. El tiempo medio que se invierte para ir de C a D por la flamante vía es de 7,5 minutos. La carretera se inaugura en un solemne acto. Al día siguiente, los conductores que viven en el barrio A están felices. Los más avispados toman el trayecto $ACDB$ y se ahorran más de dos minutos en su viaje diario al trabajo. Sin embargo, al cabo de una semana, el alcalde comienza a recibir quejas de los vecinos: protestan porque ahora tardan más que antes en llegar a B. "¿Cómo es posible —se pregunta el alcalde— que haya aumentado el tiempo de *todos* los conductores al abrirse la nueva vía? Al fin y al cabo, lo único que hemos hecho es ofrecer un nuevo trayecto posible. Si la nueva carretera produce más atascos o es más lenta, ¿por qué no vuelven los conductores a utilizar los otros trayectos, como si el tramo CD no existiera?"

Nuestro confundido alcalde está siendo víctima de la llamada *paradoja de Braess*, enunciada en 1968 por el matemático alemán Dietrich Braess. Se cree que puede ocurrir en problemas de tráfico, de redes de comunicaciones, circuitos eléctricos e hidráulicos o teoría de juegos. La formulación de la paradoja es muy simple: en ciertas ocasiones, añadir a una red de comunicaciones un nuevo tramo puede disminuir la eficiencia de la red.

Veamos qué ocurre en nuestro ejemplo. Con el tramo CD hay tres posibles caminos para ir de A a B: ACB, ADB y $ACDB$. El tiempo invertido en cada uno de ellos será:

1. Red viaria entre el barrio residencial A y el barrio de oficinas B. En verde se indican los tiempos necesarios para recorrer cada tramo de la red. La red de la derecha, en donde se ha añadido el tramo CD, resulta ser más lenta que la red de la izquierda.



2. A la izquierda, en azul, se representa el número de coches que optan por el tramo ACB cada día, que son los mismos que optan por el ADB; la curva roja es el número de coches que escogen ACDB. A la derecha: la curva azul es el tiempo (en minutos) que tardan los que han elegido ACD o ADB, la curva roja el tiempo de los que van por ACDB y la curva verde el tiempo medio de todos los conductores

$$T_{ACB} = \frac{F_{AC}}{100} + 15$$

$$T_{ADB} = \frac{F_{DB}}{100} + 15$$

$$T_{ACDB} = \frac{F_{AC}}{100} + \frac{F_{DB}}{100} + 7{,}5$$

La situación de equilibrio se alcanza cuando los tres tiempos son iguales. Al igualar T_{ACB} y T_{ADB}, obtenemos que el número de coches que atraviesa cada puente es el mismo: $F_{AC} = F_{DB}$. Finalmente, igualando T_{ADB} y T_{ACDB}, obtenemos el número de coches que pasa por el puente *DB*:

$$\frac{F_{DB}}{100} + 15 = 2 \times \frac{F_{DB}}{100} + 7{,}5 \Rightarrow F_{DB} = 750 \text{ coches}$$

Por lo tanto, el tiempo medio que tarda cada conductor será:

$$T_{ACB} = T_{ADB} = T_{ACDB} = \frac{750}{100} + 15 = 22{,}5 \text{ minutos}$$

que es mayor que el tiempo medio que tardaban los conductores antes de que se abriera el tramo *CD*. ¿Por qué no pueden, como piensa el alcalde, ignorar el nuevo tramo y utilizar sólo los tramos *ACB* y *ADB*, ya que con ello todo el mundo saldría beneficiado? Para analizar este problema, he hecho una simulación en donde los conductores tienden a cambiar de los trayectos más lentos a los más rápidos. En concreto, he supuesto que cada día se pasa de un trayecto a otro un número de conductores proporcional a la diferencia de tiempos entre los dos trayectos. En la figura 2 se puede ver el comportamiento de los conductores y el tiempo medio que emplean en los primeros días tras inaugurarse la carretera. El primer día nadie toma el trayecto *ACDB*, pero después un número creciente de conductores opta por él abandonando los trayectos *ACB* y *ADB*. Pronto se alcanza la situación de equilibrio en la que los tiempos medios en cada trayecto son iguales y ningún conductor cambia ya de camino.

En la figura 2 se ilustra también la evolución de los tiempos medios de cada trayecto (*curvas roja y azul*) y el tiempo medio de todos los conductores (*curva verde*). El primer día, puesto que nadie lo elige, el trayecto *ACDB* es bastante más rápido. Por ello, en el segundo día bastantes conductores se pasan a él, congestionando los puentes y aumentando el tiempo de todos los demás. Cuando nos encontramos en la situación de equilibrio, nadie quiere cambiar. Si, por ejemplo, 100 conductores decidieran abandonar el trayecto *ACDB* y repartirse por igual entre los otros dos, cruzarían cada puente 700 coches y los tiempos serían: *TACB* = *TADB* = 22 minutos y *TACDB* = 21,5 minutos. Aunque todos han ganado con este traspaso, los más egoístas tomarían de nuevo el trayecto *ACDB* y se volvería a la situación de equilibrio.

La paradoja de Braess nos indica que la maximización del beneficio individual no conduce necesariamente a la mejor solución. Es por tanto una seria advertencia para los fanáticos de la "mano invisible", que confían en la eficacia del mercado libre. Como muestra la paradoja de Braess, en ocasiones la solución óptima no surge de la maximización de intereses individuales, sino de medidas globales, como eliminar el tramo *CD* en nuestro sencillo ejemplo.

Pero, ¿ocurre en la realidad la paradoja de Braess? Aunque no hay pruebas contundentes, sí ha habido casos en que se ha detectado un aumento en la eficiencia de una red al cortar alguno de sus tramos. Los más conocidos han tenido lugar en barrios de Nueva York y Stuttgart. Cohen y Horowitz han formulado situaciones físicas inspiradas en la paradoja de Braess: un peso cuelga de una red de muelles y cuerdas suspendida del techo. Cuando se corta una de las cuerdas el peso asciende, contradiciendo la intuición. Han diseñado también un circuito eléctrico cuya resistencia disminuye al cortar una de las conexiones entre los elementos del circuito. Todo ello hace que la paradoja sea un campo de estudio en activo y un fenómeno a tener en cuenta en el diseño de redes de comunicaciones.

Mark Fischetti

Aeromotores

Hace siglos que los humanos aprovechamos la energía del viento. Pero los avances en el diseño de los rotores y en los controladores de circuitos integrados de alta tensión han permitido que las turbinas eólicas modernas generen un 30 por ciento más de potencia que los molinos del mismo tamaño de hace diez años.

Entonces, ¿por qué no vemos esas máquinas por todas partes? Los aeromotores actuales no producen un ruido insufrible. Tampoco interfieren con la recepción televisiva, al estar hechos de materiales compuestos y no de metal. En las zonas de vientos intensos y estables generan electricidad al precio de cuatro a seis centavos por kilowatt-hora, competitivo frente al carbón, el gas natural y las centrales nucleares, que dan energía al precio de 10 centavos por kilowatt-hora. “Lo que de veras pasa”, dice Alan Laxson, director principal de proyectos en el Centro Nacional de Técnica Eólica, perteneciente al Departamento de Energía, ubicado en Golden (Colorado), “es que, al ser el viento intermitente, ninguna empresa explotadora de turbinas puede decir a la compañía eléctrica local cuánta energía pueden fiablemente entregar”. Además, los generadores eólicos no pueden ser acelerados con la misma facilidad que una central eléctrica para satisfacer una demanda variable. En unos mejores medios para almacenar energía eólica, como las pilas energéticas, se encuentra la clave de un crecimiento importante a largo plazo. En ello se está.

Decisiva resulta, también, una inversión sostenida, la cual depende de los vientos económicos. El ejemplo estadounidense sirve de muestra. La electrificación rural que siguió a la Gran Depresión hizo obsoletos a los molinos de viento agrícolas. Tras las crisis del petróleo de 1973 y 1979 hubo un chorro de dinero federal para investigación y desarrollo, pero la donación menguó cuando el precio del petróleo volvió a caer y hubo abundancia de gas natural canadiense barato. Los inversores privados que posteriormente construyeron parques eólicos y vendían energía a las compañías eléctricas se enfrentaron a cuantiosos impagos durante las crisis energéticas californianas de 2001.

La brisa ha vuelto a levantarse. Hoy, EE.UU. posee una capacidad de energía eólica instalada de 4300 megawatts, que puede satisfacer alrededor del uno por ciento de la demanda eléctrica del país. La cantidad casi se dobló en sólo 18 meses, según Laxson, cuando entraron en vigor los créditos fiscales, cuando la ciudadanía presionó a las compañías eléctricas para que diversificaran sus fuentes energéticas en la estela de las crisis y los conflictos de Oriente Medio, y cuando los consumidores acordaron pagar un poco más por una electricidad generada con técnicas no contaminantes. Europa, en especial Dinamarca y Alemania, está a la cabeza del mundo, con una capacidad por encima de los 14.000 megawatts. ¿Incentivo? Los precios de la energía no paran de subir.

TURBINA EOLICA MODERNA
Las aspas alabeadas, hechas de materiales compuestos ligeros, aprovechan muy bien la impulsión y, así, captan la energía del viento con mayor eficiencia que las planas.

1

ROTOR



¿SABIA USTED QUE...?

➤ **EL MOLIDO TRADICIONAL**: Los historiadores de la técnica estiman que los primeros molinos de viento se construyeron en Persia y China entre 200 a.C. y 500 d.C., con unas velas de juncos que giraban en torno a un eje vertical. En el Renacimiento, los holandeses fijaban unas aspas de madera a un eje horizontal, instalado en el techo de una torre de varias plantas, que albergaba pisos destinados a moler el grano y eliminar la paja. El molinero, que vivía en la planta baja, orientaba el rotor manualmente respecto al viento.

➤ **TRANSMISION**: Los molinos de viento holandeses de aspas anchas, y los molinos de viento agrícolas americanos de muchas aspas, aunque de lenta rotación, daban el elevado par de fuerzas necesario. Las turbinas modernas, con sus mejores cajas de engranajes, requieren sólo una pocas aspas estrechas para alcanzar sustentación con buen rendimiento y rotar lo bastante rápido para accionar un generador eléctrico.

➤ **UNA COSTA NO LIMPIA**: Cape Wind Associates, de Boston, ha propuesto un borrador de planes ambientales a fin de construir un parque eólico valorado en 600 millones de dólares en los bajíos al sur de Cabo Cod para captar las fuertes brisas marinas entre las islas de Martha's Vineyard y Nantucket. La compañía levantaría 170 turbinas, de una altura cada una de 125 metros sobre el agua, para satisfacer la mitad de la demanda del cabo y las islas. Los contrarios al proyecto afirman que esas hélices gigante sucumbirían al ambiente salino y a la inexorabilidad de las olas y perjudicarían a las pesquerías, quitarían atractivos al turismo y matarían muchas aves marinas que van a limpiarse en las playas.

5
ARBOL DE BAJA VELOCIDAD
2
ANEMOMETRO
GENERADOR
4
3
MOTOR DE GUIÑADA
CONTROLADOR
ARBOL DE BAJA VELOCIDAD

1 LA CORRIENTE DE AIRE impulsa las aspas de una turbina, rotando un árbol a 15 a 60 rpm.

2 UNOS ENGRANAJES mueven un árbol de alta velocidad de 1200 a 1800 rpm, que a su vez acciona un generador de corriente alterna. Como la velocidad del viento varía, los circuitos integrados del controlador producen una salida estabilizada a 60 hertz.

3 UN MECANISMO DE GUIÑADA mantiene al rotor enfrentado al viento.

4 EL FRENO para el rotor en caso de emergencia o por necesidad de mantenimiento.

5 5. EL MOTOR, los engranajes y los rodamientos fijan las aspas en el mejor ángulo respecto al viento para maximizar la sustentación, o en sentido opuesto durante las rachas intensas; porque la energía eólica aumenta con el cubo de la velocidad, los vientos fuertes pueden quemar el generador.



LAS VELAS o las aspas de madera de los molinos antiguos aprovechaban el arrastre y la sustentación del viento para realizar trabajo, principalmente para moler grano o bombear agua.



LAS PALETAS OBLICUAS de los molinos de viento agrícolas aprovechaban mejor el arrastre y la sustentación aerodinámicos para moler grano, bombear agua o generar electricidad.

La luz

Y su medición

ALHACEN'S THEORY OF VISUAL PERCEPTION. A CRITICAL EDITION, WITH ENGLISH TRANSLATION AND COMMENTARY, OF THE FIRST THREE BOOKS OF ALHACEN'S *DE ASPECTIBUS*, THE MEDIEVAL LATIN VERSION OF IBN AL-HAYTHAM'S *KITAB AL-MANAZIR* (2 vols.). Edición preparada por A. Mark Smith. American Philosophical Society; Philadelphia, 2001. **JOHANN HEINRICH LAMBERT. *PHOTOMETRY OR THE MEASURE AND GRADATIONS OF LIGHT, COLORS AND SHADE*.** Edición preparada por David L. DiLaura. Illuminating Engineering Society of North America; 2001.

INSTRUMENTAL TRADITIONS AND THEORIES OF LIGHT. THE USES OF INSTRUMENTS IN THE OPTICAL REVOLUTION, por Xiang Chen. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht; 2000. **A HISTORY OF LIGHT AND COLOUR MEASUREMENT,** por Sean F. Johnston. Institute of Physics Publishing; Bristol, 2001. **A CENTURY OF MEASUREMENT,** por Eileen Magnello. Canopus Publishing Limited; Bath, 2000.

CITY OF LIGHT. THE STORY OF FIBER OPTICS, por Jeff Hecht. Oxford University Press; Oxford, 1999.

Entre 1028 y 1038, Ibn al-Haytham, nuestro Alhacén, terminó su monumental *Kitab al-Manazir* ("Libro de Optica"). Siglo y medio más tarde, apareció en versión latina bajo el título *De aspectibus*. Presentaba ésta la impronta de dos traductores por lo menos, uno de ellos, identificado sin suficiente respaldo con Gerardo de Cremona, que se mantuvo fiel al texto original y otro atento a lo esencial del contenido, al que añade paráfrasis propias. Existen otras discrepancias de mayor calado, en estructura y terminología, entre el texto árabe y la versión latina. Si contábamos ya con la edición crítica de la entrega árabe de los tres primeros libros (un trabajo espléndido de A. I. Sabra comentado en estas páginas), el lector dispone ahora de un estudio exhaustivo de cómo entendieron la óptica los medievales latinos.

De la pluma de Ibn al-Haytham, que nació en Basora en torno al 965 y vivió en Egipto, salieron numerosos escritos sobre óptica geométrica, óptica fisiológica, espejos ustorios, ilusión lunar (alargamiento aparente del Sol y la Luna hacia el horizonte), la luz, halos y arco iris, cualidad de las sombras, forma de los eclipses. Su *Kitab al-Manazir* consta de siete libros. Los tres primeros, dedicados a la percepción visual, forman una unidad autónoma. Aborda en los tres siguientes la reflexión (espejos e imágenes especulares), para concluir en el séptimo con la refracción.

Hunde las bases físicas de la visión en la radiación de luz y color, que se transforman en impresiones visuales a través de la relación entre la anatomía del ojo y su dependencia cerebral. Detalla en particular las precondiciones del acto perceptivo, vale decir, luminosidad, tamaño, opacidad parcial y distancia del objeto, transparencia del medio interpuesto y capacidad anatómica del ojo. Cuando estas precondiciones exceden de ciertos límites o no alcanzan determinado umbral, se producen los errores de percepción. Acontece tal cuando el objeto brilla demasiado o posee una luz muy pálida, si el medio interpuesto carece de la transparencia suficiente, etcétera.

Para Alhacén, la luz (*lux*) constituye una propiedad inherente del Sol y las estrellas. Se replica a través de medios continuos transparentes. Tales medios se hallan, a su vez, preparados para recibir y transmitir la luz como una representación (*forma*) de su instancia original en el objeto luminoso. En ese estado de manifestación de sí misma en el medio se denomina, en la versión latina, *lumen*. Todas las superficies luminosas pueden resolverse en un mosaico de fuentes puntuales independientes o, mejor, de manchas, que posibilitan una emisión radial continua. El color, concomitante natural de la opacidad, guarda una relación mutua con la luz: si la opacidad permite que el color brille, éste aporta a aquélla una suerte de pantalla a través de la cual pueda ejercer su función iluminadora.

De la doctrina óptica de Alhacén se hicieron eco no sólo Roger Bacon, Witelo, John Pecham y otros tratadistas medievales. Su influjo persiste hasta el siglo XVIII (*Johann Heinrich Lambert. Photometry or The Measure and Gradations of Light, Colors and Shade*). Ahora bien, pese al tratamiento analítico e inductivo que aquí recibe, la cuantificación de la luz, la fotometría, conoció un desarrollo muy lento.

Francesco Maurolyco, en el primer tercio del siglo XVI, establece una serie de supuestos de interés en esa dirección, que podemos reducir al carácter rectilíneo de la emisión de una fuente puntual, y la intensidad de la luminosidad, que depende del número y densidad de los rayos. Kepler, a principios del XVII, culmina, por un lado, la óptica medieval; por otro, aporta la semilla de la fotometría, el principio de la atenuación de la luz con el cuadrado inverso de la distancia.

Treinta años después, en 1634, Marin Mersenne exponía explícitamente la ley kepleriana del inverso del cuadrado, para valorar el efecto de fuentes luminosas puntuales. (Más ardua resultaba la matematización de fuentes extensas.) En un primer ensayo de astrofotometría, Christiaan Huygens, para averiguar las distancias estelares, comparó la *claritas*, o brillo, de las estrellas con el del Sol, apoyado en la ley del inverso del cuadrado. A esos primeros ensayos siguieron los de

François-Marie, Anders Celsius y, sobre todo, Pierre Bouguer, autor del primer trabajo consagrado en exclusividad a la fotometría, aparecido en 1729, su *Essai Optique*. Divido en dos partes, versa la primera sobre la aplicación de la ley del inverso del cuadrado para deducir la razón entre intensidades luminosas de dos fuentes; en la segunda, se ocupa de la disminución de la luz a su paso por medios translúcidos.

Sin embargo, el tratado sistemático de la cuestión no llegó hasta la publicación, en 1760, de la *Photometria* de Johann Heinrich Lambert. Introduce aquí la mayoría de los conceptos fotométricos, engarzados en una sistema coherente de magnitudes precisas para su inclusión en enunciados matemáticos, con los que construye los principios de la fotometría. Creó para ello una disposición óptica en la que dos campos luminosos adyacentes brillaran igualmente, cuando dos magnitudes fotométricas que los producían eran desiguales en determinada proporción específica.

Además, Lambert resolvió el problema planteado por las fuentes luminosas extensas, mediante la ley del coseno de emanación. Apoyado en ésta, calculó el brillo medio de la Luna y los planetas. Hizo mucho más. Por ejemplo, medir la composición cromática de las superficies blancas y coloreadas, establecer que la cantidad de luz reflejada en la interfaz de dos medios depende de sus densidades ópticas y determinar un coeficiente de extinción para los vidrios.

No entró, sin embargo, en la cuestión disputada en su tiempo, verdadero quicio de la óptica de la segunda mitad del siglo XVIII, a saber, la de si la luz constituía una partícula o una onda en el medio etéreo (*Instrumental Traditions and Theories of Light. The Uses of Instruments in the Optical Revolution*). Lo que ha dado en llamarse revolución óptica, la sustitución de la teoría corpuscular por la tesis ondulatoria, se vivió con especial intensidad en Gran Bretaña.

Desempeñó un papel sustantivo en el cambio el descubrimiento del principio de interferencia por Thomas Young. No menos determinante fue la instrumentación; para ser más exactos, el uso e interpretación de los datos recogidos mediante espectroscopios, telesco-

Especie y especiación

FROG, FLIES, AND DANDELIONS. THE MAKING OF SPECIES, por Menno Schilthuizen. Oxford University Press; Oxford, 2001.

Con un estilo ágil, con toques de humor y con un agudo sentido crítico, Schilthuizen, científico y periodista, hace atractiva la lectura de un libro que en tan sólo 199 páginas presenta los conocimientos más recientes sobre los modos de especiación. En efecto, el 71 % de las citas bibliográficas utilizadas en el libro corresponden a publicaciones aparecidas a partir de 1980.

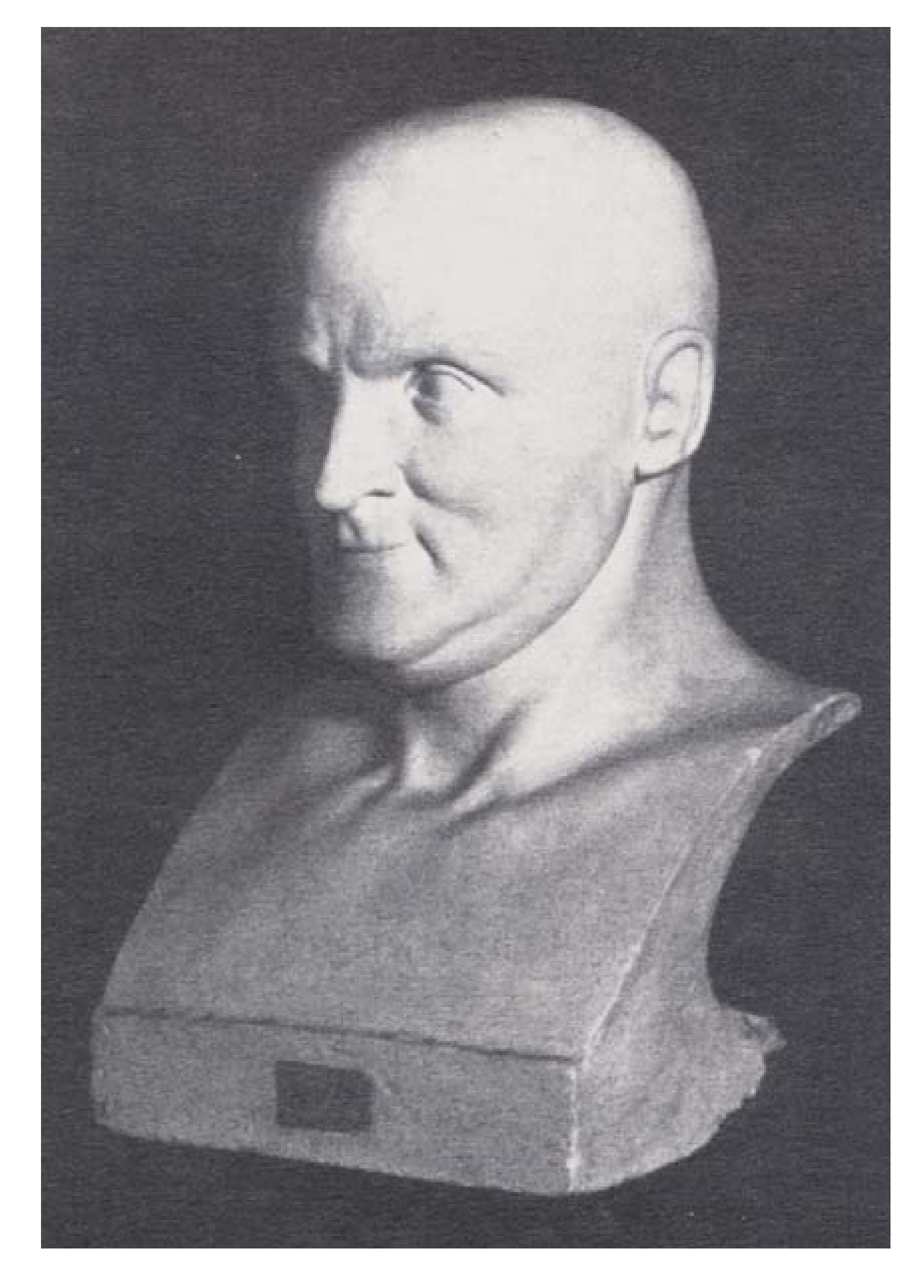
"*Archirrhinos haeckelii*, de las islas Hi-lay del Pacífico, es una criatura notable" es la frase inicial del prólogo, que ya de entrada pone de manifiesto el talante con que está escrito el libro, pues se refiere a un organismo y a unas islas inexistentes. Se trata de una especie descrita en un libro sobre los Rhinogradentia (orden de mamíferos imaginario) escrito por el profesor de zoología alemán G. Steiner, utilizando el seudónimo de Harald Stümpke (1957). Para Schilthuizen, la historia de los Rhinogradentia es una de las mejores bromas científicas del siglo (Stümpke, H. [1957]. *Bau und Leben der Rhinogradentia*. Gustave Fischer, Stuttgart).

Llevado de su agudo sentido crítico, Schilthuizen no da una definición de especie en el glosario del final del libro, donde se lee: "No es posible una contestación fácil (véase el capítulo 1)". En este capítulo rechaza, acertadamente, las definiciones conceptuales de especie, en particular el concepto biológico de Mayr, es decir, que las especies son grupos de individuos que se reproducen o pueden reproducirse entre sí y que están sexualmente aislados de otros grupos. Prefiere, de acuerdo con Darwin, admitir que "Especie es sólo un término biológico formalizado para designar lo que los no biólogos llaman simplemente tipos, formas o clases". Lástima que no comente la limitación que también tiene este modo de ver qué son las especies, pues con el único criterio de la semejanza externa no se distinguen las especies gemelas, a pesar de que están aisladas sexualmente y son, por tanto, líneas evolutivas independientes. Si el concepto biológico de especie no tiene aplicación universal porque existen formas diferentes que se cruzan, tampoco la tiene el concepto tipológico, porque existen formas iguales que no se cruzan, las especies llamadas gemelas. Propiamente, esto justifica lo que dice en la entrada *especie* del glosario del final del libro: "No es posible una contestación fácil".

Basándose, principalmente, en observaciones recientes pone al día las ideas de Mayr sobre la especiación, por aislamiento geográfico y por efecto fundador. Así, concluye que "el esqueleto de la especiación geográfica se mantiene, pero donde Mayr vio sucesos fundacionales y revoluciones genéticas, actualmente vemos carreras de armamentos y selección sexual fisheriana."

También trata extensamente de la especiación simpátrica. Se refiere primero al ejemplo clásico de la mosca de los frutales *Rhagoletis pomonella* y luego a otros semejantes, descritos posteriormente en mariposas nocturnas de los géneros *Cydia* e *Yponomeuta*, en los que también la colonización de una nueva planta huésped conduce al origen de una nueva especie. Las numerosas especies de cíclidos del lago Victoria y de otros lagos africanos, originadas por aislamiento reproductor, son otros ejemplos recientes de especiación simpátrida descritos en el libro, en los que se destaca la importancia que a veces tiene la reproducción sexual en la especiación, en línea con las ideas que desarrolla en el capítulo 4, titulado "Seductive theories", refiriéndose a la selección sexual.

—ANTONIO PREVOSTI



1. Johann Heinrich Lambert (1728-1777). Busto esculpido por su sobrino en 1811

pios, polarizadores, fotómetros, rejillas, prismas y aperturas. A ese enfoque Xen lo denomina tradición instrumental, de la que percibe una doble vertiente antagónica, la que consideraba auxiliares de la capacidad del ojo los aparatos ópticos y la que desconfiaba del poder discriminante de la visión, haciendo de los efectos ópticos mediciones geométricas.

Se apuntaron a la tesis ondulatoria, entre otros, John Herschel, George Airy y Baden Powell. Nunca abjuraron de su militancia corpuscular David Brewster, Henry Brougham, John Barton y Richard Potter. Pese a la superior potencia explicativa del modelo de onda, defendían los segundos que la tesis corpuscularista, con el añadido del concepto de interferencia, daba cuenta cabal de los fenómenos ópticos. Brewster adoptaba el sistema newtoniano, que dividía tales fenómenos en ocho categorías, corroborándolo con lo observado mediante un analizador para modificar la intensidad de la luz polarizada. Herschel, en la estela de Fresnel y tomando el estado de polarización como criterio único, abogaba por un sistema dicotómico.

Sirviéndose de un teodolito, el ondulista Powell midió las posiciones angulares de las líneas espectrales y atribuyó las diferencias entre espectros prismáticos y espectros de difracción a efectos ópticos. Con el ojo y un telescopio de alto poder de magnificación, el corpuscularista Brewster contaba el número de líneas espectrales y creía que las diferencias entre espectros prismáticos y de difracción se originaban en las interacciones entre luz y materia. Para resolver tanta discrepancia interpretativa de los datos escuetos hubo que aguardar al advenimiento de rejillas de alta calidad que permitieran replicar los experimentos.

La polarización por reflexión había sido descubierta en 1809 por Etienne Malus (*A History of Light and Colour Measurement*). Dedujo una ley de intensidad en función del ángulo de polarización, que relaciona la cantidad de luz transmitida y reflejada por dos polarizadores en serie con el ángulo entre los ejes de polarización. Pese a todo, el reto de la medición de la intensidad de la luz perduró hasta finales del siglo XIX.

Hubo, empero, pasos intermedios de interés. Podía haberse esperado que el desarrollo de la fotografía promoviera su solución. Pero en un comienzo le preocupaba más el efecto de la luz sobre la placa fotográfica que la intensidad propiamente dicha. La atención se centró también en la fotoquímica, es decir, en la búsqueda de nuevos materiales sensibles a la luz, métodos de revelado y procesos de "fijación". Además de la importancia absoluta del tiempo de exposición.

Pareja reticencia fotométrica mostraron los astrónomos. Si bien se abría un sinfín de aplicaciones —determinación de las magnitudes estelares, luminosidad de las estrellas variables y fenómenos de eclipse— sólo se produjeron incursiones esporádicas en ese campo. Tampoco quemaron etapas quienes en los años treinta y cuarenta de ese siglo XIX supieron de la relación entre calor radiante y brillo de la luz. Sin embargo, un decenio más

El núcleo de un clásico

Bernhard Riemann. Riemann Selecta. Edición y estudio introductorio de José Ferreirós. Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Madrid, 2000.

El editor y traductor presenta en versión bilingüe hispano-alemana una selección de diez artículos tomados de la publicación de las *Obras completas de Riemann* realizada por Springer en 1991, a los que añade el texto *Sobre variedades y geometría (1852/53),* entresacado de dos fragmentos de Riemann, en aquella fecha inéditos. Cuatro de los textos elegidos son de matemáticas y el resto de física, filosofía, psicología, fisiología y teología. El libro incluye también las *Aclaraciones a la lección inaugural de Riemann*, escritas por Henry Weyl en 1923, así como un extenso estudio introductorio de 149 páginas, una relación de los autores citados por Riemann, de los que se hace un brevísimo comentario, y un índice onomástico.

Sobra cualquier comentario acerca de los textos de Riemann, uno de los más grandes matemáticos de todos los tiempos. Ensalzar su figura para resaltar el interés del libro, sólo sería añadir nuevos superlativos a la ingente lista de los que ya le han sido dedicados y bastará recordar que, como se ha señalado repetidamente, pocas veces un nombre ha pasado a la historia de la matemática vinculado a tantos conceptos, métodos, teoremas, teorías, conjeturas, condiciones, hipótesis, etc. como el suyo: *integral de Riemann, geometría de Riemann, teorema de Riemann-Roche sobre funciones algebraicas, método de Riemann sobre series trigonométricas, función zeta de Riemann, curvatura de Riemann, matrices de Riemann en teoría de funciones algebraicas, condición de integrabilidad de Riemann,* ... Los problemas propuestos por Riemann han sido y siguen siendo el tema de investigación de multitud de matemáticos y la conjetura que lleva su nombre, que quizá nunca llegue a resolverse y que hoy se presenta como inseparable de la conjetura de Artin —dos aspectos de una misma cuestión algebraico geométrica— es considerada por muchos como el más importante de los problemas actualmente abiertos.

Junto a los textos de Riemann seleccionados, siempre densos, frecuentemente oscuros y en ocasiones misteriosos, Ferreirós nos presenta un magnífico estudio introductorio a su obra multidimensional, que contiene una biografía del autor, con su multiplicidad de intereses, su peculiarísima forma de abordar los problemas y su tendencia unificadora, así como una excelente descripción del ambiente intelectual en el que se desarrollaron sus ideas.

La biografía de Riemann (1826-1866) comienza con una descripción de su carácter tímido, que al propiciar su tendencia al aislamiento, iba más tarde a contribuir decisivamente a la originalidad de su pensamiento. Luego el autor nos describe sus primeros pasos en los Institutos de enseñanza media de Hannover y Lünneburg, donde ya es descubierto su extraordinario talento matemático, por lo que se le prestan obras de Euclides, Arquímedes, Descartes, Newton y Legendre, que él asimila con rapidez.

A esta primera etapa sucede su estancia en Göttingen a partir de 1843, que coincide con la decadencia del idealismo y un rápido auge del positivismo, acompañado de ideas materialistas, pero con el recuerdo de Leibniz aún en el ambiente. En ese período Riemann parece al menos tan interesado por la física como por las matemáticas, sin dejar nunca de lado los problemas de otras ciencias naturales, así como de la filosofía y la teología. Esta variedad de miras le llevan a asistir a los cursos y seminarios más variados y a entrar en contacto con las ideas de personajes tan distintos como Herbart, Fechner, Lotze y los hermanos Weber, con el común denominador de su interés por la filosofía y las ciencias de la naturaleza. En el campo de las matemáticas el ambiente de Göttingen estaba enormemente influenciado por la colosal figura de Gauss y, posteriormente, por Dirichlet, Dedekind y Heinrich Weber.

Por tratarse de un aspecto menos conocido de la biografía de Riemann, resulta especialmente interesante el relato de Ferreirós acerca de la multiplicidad de temas de física que le ocuparon, de su pretensión de encontrar una formulación matemática unificada de los principales fenómenos físicos que se conocían en su tiempo, de sus especulaciones acerca de la naturaleza del espacio, todo ello sin dejar de lado cuestiones relacionadas con el potencial, el magnetismo, etc.

Respecto a sus contribuciones matemáticas, Ferreirós presta especial atención a su costumbre de enfocar todo tipo de problemas de la forma más general y abstracta, siguiendo así la tendencia iniciada por Gauss y Dirichlet y que va a caracterizar a la matemática posterior. El análisis de la obra de Riemann lleva a Ferreirós a estudiar sus contribuciones a la clarificación de los conceptos de infinito, función y variedad n-dimensional, al estudio de las series de Fourier, la topología, los conceptos básicos de la geometría diferencial, a la geometría y superficie que llevan su nombre, y finalmente a la teoría de números.

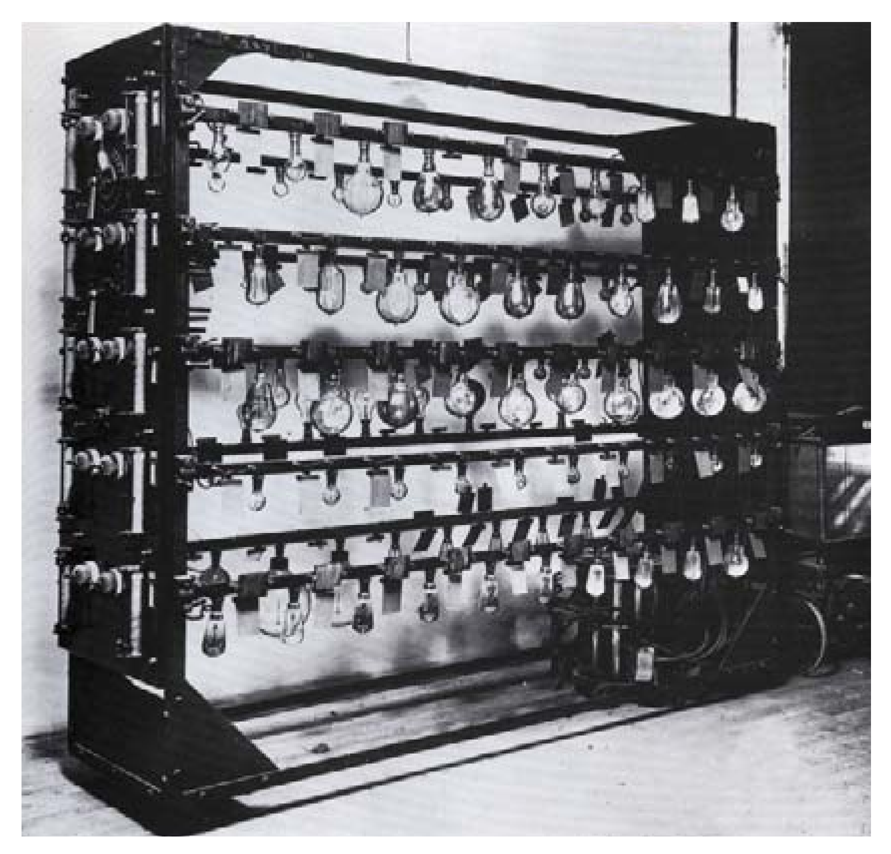
El autor termina poniendo de relieve la pretensión permanente de Riemann de trazar puentes y establecer conexiones entre distintas ramas de las ciencias y particularmente entre la física y las matemáticas, aplicando por ejemplo a éstas métodos de la teoría del potencial y a aquélla conceptos de la topología.

Hay que agradecer al profesor Ferreirós su esfuerzo en la elaboración de un libro tan interesante.

—José F. Prida

tarde, los astrónomos comenzaron a otear más allá del tiempo astronómico y la medición de la posición. En la observación sistemática de las estrellas y su clasificación, el brillo comenzó a interesar. William C. Bond aplicó métodos fotográficos a la fotometría estelar.

En el último tercio de la centuria, Charles Zenger presentó un método para medir la intensidad relativa de los discos y satélites planetarios: anotó el tiempo de desaparición de los rasgos planetarios cerca del crepúsculo; basó su trabajo en el realizado por Bunsen (analizador espectral), quien había utilizado una técnica fotográfica para medir



2. Prueba de bombillas en el Laboratorio Nacional de Física británico

la intensidad de fondo del firmamento frente a la distancia cenital del Sol. La primera *Fotometría del Observatorio de Harvard*, aparecida en 1884, catalogaba unas 4000 estrellas. En 1908 Edward C. Pickering aportaba un elenco de 45.000. A principios del siglo XX la fotometría astronómica se había convertido en tarea rutinaria.

Con todo, el factor desencadenante fue más prosaico: el recibo de la luz. Se necesitaba conocer la cuantía exacta de la intensidad. No debe extrañarnos que los fotómetros empleados por los inspectores de gas fueran mucho mejores que los disponibles en los laboratorios universitarios. El primer organismo internacional al que le preocupó la medición de la luz fue la Comisión Internacional de Fotometría, promovida por el Congreso Internacional de Gas celebrado en París en 1900.

La fotometría se institucionalizó. Así, con la fundación del Laboratorio Nacional de Física británico (*A Century of Measurement*). Ese centro benemérito acuñó unidades y patrones en un momento de eclosión de la industria, amén de convertirse en poderosa fuerza innovadora (desde el desarrollo del radar hasta la invención del ordenador, de los relojes atómicos a la primera red de área local del mundo). Si una de sus primeras tareas consistía, a principios del siglo XX, atender las pruebas de bombillas, en 1949 contribuía a establecer nuevas unidades fotométricas, la candela entre ellas.

En el período de entreguerras, comités e institutos aunaron esfuerzos para estandarizar la medición de la luz y el color. Ello requería un nuevo marco conceptual, más especializado. Se ahondó, en consecuencia, en los tres dominios principales: fotometría (medición de la luz visible), colorimetría (medición del color) y radiometría (medición de las radiaciones invisibles). Las nuevas técnicas fotoeléctricas para medir la intensidad de la luz arrinconaron definitivamente la función del ojo y engendraron nuevos instrumentos.

Refinada a lo largo de los decenios, con el impulso militar que recibió en el entorno de la guerra fría, la fotometría ha cedido la primacía a la información óptica (*City of Light. The Story of Fiber Optics*). Se entiende hoy por fibra óptica la guía de ondas con geometría cilíndrica; consta de un núcleo de vidrio puro (de 6 a 250 micras de diámetro) que presenta propiedades dieléctricas, y un revestimiento protector (de 10 a 150 micras de espesor cuyo índice de refracción es ligeramente superior. La interfase entre el núcleo y el recubrimiento actúa como espejo cilíndrico en el que tiene lugar la reflexión total interna de la luz.

Para llegar a esta realidad que se extiende por todo el planeta, hubo que andar un largo recorrido, de más de siglo y medio. En 1841 Daniel Colladon, joven profesor de la Universidad de Ginebra, realizó la primera guía de la luz. Colectó la luz solar y la canalizó a través de un tubo hacia la mesa de una sala de conferencias mortecina, sirviéndose de una lente focalizadora y un chorro de agua; cuando los rayos luminosos del agua golpeaban el borde del chorro a determinado ángulo, la reflexión interna total los atrapaba en el líquido. En vez de viajar en línea recta, la luz seguía la curva del agua. Colladon envió la reseña del mecanismo a François Arago, quien los publicó en *Comptes Rendus*. En 1889 *Scientific American* se hacía eco de la fontana luminosa, creada por Colladon, que embellecía la entrada principal de la Exposición de París.

Menos teatral, Henry C. Saint-René diseña en 1895 un sistema de doblar varillas de vidrio para guiar la luz en un primer esbozo de televisión. En 1926, C. Francis Jenkins solicita una patente de un receptor mecánico de televisión en el que la luz pasa a través de varillas de cuarzo en un tambor giratorio para formar una imagen. Ese mismo año John Logie Baird solicita una patente de una disposición de varillas paralelas de vidrio o tubos huecos para vehicular la imagen hasta una televisión mecánica. Colladon, Saint-René, Baird y Jenkins entendieron el potencial de la guía de luz por reflexión interna total. Pero ninguno de ellos aprehendió la elegante simplicidad de la transmisión a través de un haz de finas fibras de vidrio. Eso quedaría reservado a Clarence W. Hansell, quien, también en 1926,

Mecánica cuántica

AN INTRODUCTION TO QUANTUM THEORY, por F. S. Levin. Cambridge University Press; Cambridge, 2002.

Es raro el año en el que no se publican al menos media docena de libros de introducción a la mecánica cuántica. Curiosamente, en la mayoría de los casos, sus contenidos difieren poco. La pregunta es por qué se siguen editando tantos libros de este tipo. La respuesta probablemente tiene que ver con que la mecánica cuántica es una empresa intelectual elegante, intrigante, a menudo anti-intuitiva, salpicada de sorpresas y radicalmente distinta de la física clásica; sobre todo, porque constituye la más poderosa herramienta de investigación de los fenómenos microscópicos.

La explicación del estrecho parecido entre unos libros y otros ya no es tan sencilla. Quizá se debe a que tratar los temas considerados esenciales con la adecuada extensión, requiere un libro tan voluminoso como el que nos ocupa, casi 800 páginas, donde ya no queda sitio para más. Sin embargo, esto no justifica que, ya en el siglo XXI, se siga sin incluir el entrelazamiento y sus aplicaciones (por ejemplo el teletransporte) entre las materias básicas de cualquier curso de mecánica cuántica. Salvo por esta objeción, estamos ante un libro muy interesante, rico en contenidos y que no se limita a enseñar a calcular usando la mecánica cuántica, sino que además no elude las implicaciones del formalismo.

El libro consta de una primera parte introductoria con capítulos sobre la necesidad de una descripción no clásica de los fenómenos microscópicos, la equivalencia entre los conceptos de la física clásica y la cuántica, una comparación entre la ecuación de onda para una cuerda tensa y la ecuación de Schrödinger para una partícula en una caja unidimensional, y las matemáticas imprescindibles en mecánica cuántica (teoría de operadores lineales en espacios de Hilbert). La segunda parte comienza con los postulados de la mecánica cuántica, que se aplican a continuación al estudio de problemas unidimensionales. En la tercera parte se estudian sistemas de pocos grados de libertad: momento angular orbital, sistemas de dos partículas, partículas cargadas en un campo electromagnético, espín y colisiones. En la cuarta y última parte se introduce el estudio de los sistemas complejos: teoría de perturbaciones dependientes e independientes del tiempo, método WBK, sistemas atómicos.

Intercalados encontramos algunos temas más “modernos”, entre los que destacan el efecto Aharonov-Bohm, la fase de Berry, la violación de la desigualdad de Bell, la formulación de Feynman mediante integrales de caminos o los estados coherentes. Deben destacarse también los magníficos ejercicios que se incluyen al final de cada capítulo: son asequibles para el estudiante, equilibrados e instructivos. Mención aparte merece la cuidadosa edición, la inclusión de adecuadas referencias históricas y la abundancia de referencias bibliográficas.

—ADÁN CABELLO QUINTERO

propone un haz de formación de imágenes de fibra óptica.

Por su parte, los médicos venían empeñados, sin éxito, en construir instrumentos que les permitiera observar el interior del cuerpo. No podía tratarse de un tubo rígido, pues aunque el esófago es bastante recto, no lo son ni la entrada ni la salida del mismo. Algunos progresos se realizaron después de la primera guerra mundial. Rudolf Schindler desarrolló un gastroscopio semiflexible. Fue un ligero avance. Su discípulo Heinrich Lamm pensó que un haz de fibras de vidrio sería mucho más flexible.

Lo mismo que Hansell, Lamm se dio cuenta de que un haz de fibras podría vehicular una imagen punto por punto si las fibras se disponían de forma coherente en ambos extremos. Pero ni uno ni otro acertaron a sospechar que la luz se deslizaba entre las fibras de vidrio allí donde entraban en contacto. Para evitarlo bastaba con revestir o chapar la fibra portadora de luz con un material transparente que tuviera un índice de refracción muy bajo.

Así lo entendieron, a principios de los cincuenta, Brian O’Brien, con van Heel, y Hodger Meller Hansen. En el artículo que publicó en *Nature* en 1953 van Heel no hablaba de óptica de fibra sino de “representación óptica de imágenes sin utilizar lentes ni espejos”. Sin embargo, los avances definitivos se promoverían en el Laboratorio de Normalización de las Telecomunicaciones, desde que en 1964 Charles K. Kao se hace cargo del programa de investigación. Al año siguiente, Kao establece que el límite fundamental para la transparencia de un vidrio está por debajo de los 20 decibelios por kilómetro, lo que sería soportable para las comunicaciones. Y en 1970 demuestra la transmisión por fibra óptica. Ese mismo año Robert Maurer, Donald Keck y Peter Schultz crean una fibra de un solo modo con pérdidas de 16 decibelios por kilómetro a 633 nanómetros mediante el dopaje de la fibra con titanio. Lo que viene después es una carrera por rebajar las cifras, según el material dopante.

—LUIS ALONSO



3. Charles Kuen Lao, creador de las comunicaciones por fibra óptica

Dennis E. Shasha

Justicia ciega

Un juez con inclinaciones matemáticas se vale de una forma muy peculiar de arbitraje para resolver litigios dinerarios. Como en tantos otros arbitrajes, las partes exponen sus pruebas y argumentos al juez. Pero la parte demandante, antes de comenzar, anota en un papel cuánto cree que se le debe —llamemos P a tal cantidad— e introduce la nota en un sobre, que cierra. La querellada, por su lado, escribe cuánto está dispuesta a pagar —sea D ese monto— y guarda su papel en un sobre aparte.

El juez desconoce las cantidades P y D. Oídas las razones de los litigantes, el juez determina una compensación económica equitativa, que llamaremos J. Pero en esta forma de arbitraje, la cantidad realmente abonada al demandante se determina por comparación de J con P y D. Si J se aproxima más a P que a D, la parte demandada habrá de pagar P; por el contrario, si J se aproxima más a D, ésta será la cantidad que haya de pagar la querellada. Supongamos, por ejemplo, que el demandante considera que merece 18 millones de euros, que la demandada estima que no ha de pagar nada y que el juez decide que la compensación ha de ser de 8 millones. Dado que 8 millones está más cerca de 0 que de 18 millones, el demandante no recibe nada.

El problema consiste en hallar una estrategia óptima para el demandante. Supongamos que el juez da a entender que su decisión estará entre 3 y 10 millones, y que todos los números de ese intervalo tienen la misma probabilidad de resultar elegidos. ¿Cuánto debe solicitar el demandante para maximizar su compensación esperada? ¿Deberá modificar su solicitud si sospecha que la demandada será capaz de leer el número P a través del sobre cerrado?

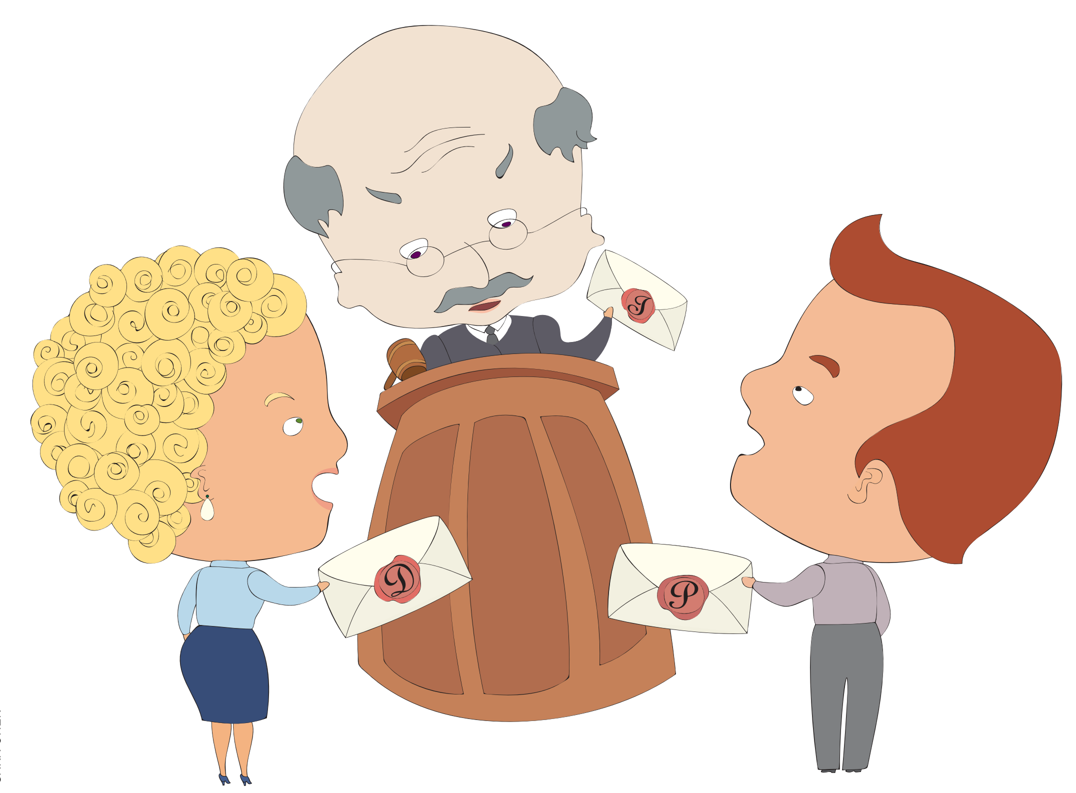
Solución del problema del mes pasado:

C entró en la cabaña de A.
D entró en la cabaña de F.
C le dijo a F que D había entrado en la cabaña de F. B le dijo a E que A había entrado en la cabaña de E. A le dijo a F que D había entrado en la cabaña de F. F le dijo a A que C había entrado en la cabaña de A. E le dijo a B que A entró en la cabaña de B. A le dijo a B que C entró en la de B.

Se puede ver una explicación completa en www.investigacionyciencia.es

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.



SARA CHEN